

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2016**

**David Lazecký**

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Analýza a predikce ztrát na vedeních PS**  
**Analysing and Estimation of Technical Losses in**  
**Transmission Network**

**2016**

**Bc. David Lazecký**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. David Lazecký**

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

**Analýza a predikce ztrát na vedeních PS**  
**Analysing and Estimation of Technical Losses in Transmission Network**

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Přenosová soustava ČR
2. Metodika výpočtu technických ztrát, predikce ztrát
3. Rozbor databází vybraných měřených hodnot
4. Rozbor technických ztrát, možnosti predikce ztrát pro vybraná vedení přenosové soustavy

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Hradílek, Z. Elektroenergetika, skriptum, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1992  
[2] Rudolf, L. Komplexní rozbor technických ztrát přenosové soustavy, habilitační práce, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Vladimír Král, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
*vedoucí katedry*



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

**Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 29. dubna 2016

  
David Lazecký

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval panu doc. Ing. Vladimíru Královi, Ph.D. za pomoc při získání materiálů a rady pro vypracování práce.

Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu a pevné nervy v průběhu vypracování práce.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá řešením problematiky technických ztrát u vedení přenosové soustavy České republiky. V úvodu je popsán historický vývoj soustavy, současný stav a plány investic v budoucnu. Hlavní část se věnuje teoretickým základům řešení problematiky technických ztrát - Jouleových ztrát, ztrát korónou a ztrát svodem. Po objasnění vybraných použitých statistických pojmů následuje charakteristika použitých dat, specifikace přenosových parametrů ve vybraných sledovaných obdobích. Následuje vyhodnocení výpočtu Jouleových ztrát a závislostí spojených s ostatními druhy ztrát. Výstup práce je reprezentován regresními polynomy uvedenými v závěru práce spolu s vyhodnocením postupu, možných chyb a porovnáním některých získaných polynomů.

## **Klíčová slova**

Přenosová soustava, technické ztráty, Jouleovy ztráty, ztráty korónou, ztráty svodem, zvlášť vysoké napětí, analýza, predikce, databáze

## **Abstract**

This thesis analyses the issue of technical losses in transmission system lines in the Czech Republic. The introduction describes the historical development of the transmission system, current status and plans for investments in the future. The main part deals with the theoretical fundamentals of tackling technical losses - Joule's losses, corona losses and leakage current losses. Clarification of the selection of the statistical concepts is followed by characterization of transmission system data, specifications of transmission parameters of the selected monitored periods. The evaluation of the calculation of the Joule's losses is followed by dependence associated with other types of losses. The output of this work is represented by polynomial formulas in the conclusion, together with the evaluation procedure, potential errors, and a comparison of some acquired polynomials

## **Keywords**

Transmission system, technical losses, Joule losses, corona losses, leakage current losses, high voltage, analysis, prediction, database

## Obsah

Seznam některých použitých symbolů a zkratek .....	8
Seznam ilustrací .....	9
Seznam tabulek .....	10
1 Úvod .....	11
2 Přenosová soustava ČR .....	12
2.1 Historie [1], [6], [7] .....	12
2.2 Současný stav [8] .....	17
2.3 Rozvoj [7], [9] .....	19
3 Metodika výpočtu technických ztrát, predikce ztrát .....	21
3.1 Technické ztráty [1], [3], [4], [11] .....	21
3.1.1 Jouleovy ztráty .....	23
3.1.2 Ztráty korónou .....	26
3.1.3 Ztráty svodem .....	30
3.1.4 Výpočty střídavých vedení .....	31
3.2 Predikce ztrát .....	33
4 Vybrané statistické pojmy použité při řešení [4], [12] .....	35
4.1 Regresní analýza .....	35
4.2 Koeficient determinace .....	35
4.3 Koeficient korelace .....	35
4.4 Aritmetický průměr .....	36
4.5 Medián .....	36
4.6 Absolutní chyba .....	36
4.7 Relativní chyba .....	36
5 Rozbor databázi vybraných měřených hodnot .....	37
5.1 Popis databáze .....	37
5.2 Úpravy poskytnutých dat .....	37
5.3 Předpoklad chyb .....	37
5.4 Analyzované linky .....	38
5.4.1 Zima (22. 2. – 25. 3. 2014) .....	40
5.4.2 Jaro (1. 4. – 2. 5. 2014) .....	42
5.4.3 Léto (1. 8. – 1. 9. 2014) .....	44

5.4.4	Podzim (1. 11. – 2. 12. 2014) .....	46
6	Rozbor technických ztrát, možnosti predikce ztrát pro vybraná vedení přenosové soustavy .....	48
6.1	Analýza ztrát a získání predikčních křivek .....	48
6.1.1	Vyhodnocení Jouleových ztrát z dat a výpočtem .....	49
6.1.2	Výpočet ostatních technických ztrát .....	51
6.1.3	Vyhodnocení závislosti Jouleových ztrát na teplotě .....	52
6.2	Predikce .....	53
6.2.1	Polynomy predikčních křivek V435 .....	54
6.2.2	Polynomy predikčních křivek V441 .....	55
6.2.3	Porovnání predikčních křivek V435 a V441 .....	57
6.2.4	Porovnání výsledků s [13] .....	58
7	Závěr .....	59
8	Literatura .....	61



## Seznam některých použitých symbolů a zkratek

Značka	veličina	Jednotka
Zkratka		
ČEPS	Česká přenosová soustavy	
ČR	Česká republika	
DS	distribuční soustava	
PS	přenosová soustava	
VVN	velmi vysoké napětí	
ZVN	zvlášť vysoké napětí	
I	proud	A
P	činný výkon	W
Q	jalový výkon	var
R	odpor	$\Omega$
S	zdánlivý výkon	VA
U	napětí	V
dP	Jouleovy ztráty	W
f	frekvence	Hz
l	délka	km

## Seznam ilustrací

Graf 1 - měřené přenosy výkonů a teplota, V435 v zimě.....	40
Graf 2 - měřené přenosy výkonů a teplota, V441 v zimě.....	40
Graf 3 - měřené přenosy výkonů a teplota, V435 na jaře.....	42
Graf 4 - měřené přenosy výkonů a teplota, V441 na jaře.....	42
Graf 5 - měřené přenosy výkonů a teplota, V435 v létě.....	44
Graf 6 - měřené přenosy výkonů a teplota, V441 v létě.....	44
Graf 7 - měřené přenosy výkonů a teplota V435 na podzim.....	46
Graf 8 - měřené přenosy výkonů a teplota V441 na podzim.....	46
Graf 9 – Závislost Jouleových ztrát na přenášeném výkonu z měřených dat V435, všechna období...	49
Graf 10 – Závislost Jouleových ztrát na přenášeném výkonu z měřených dat V441, všechna období.	50
Graf 11 – Absolutní odchylka vyhodnocení křivek Jouleových ztrát pro všechny výkony na V435 ...	50
Graf 12 – Absolutní odchylka vyhodnocení křivek Jouleových ztrát pro všechny výkony na V435 ...	50
Graf 13 – Vyhodnocení ostatních technických ztrát na V435 podle teploty pro všechna období .....	51
Graf 14 – Vyhodnocení ostatních technických ztrát na V441 podle teploty pro všechna období .....	52
Graf 15 – Vyhodnocení závislosti Jouleových ztrát na teplotě pro V435 pro všechna období.....	52
Graf 16 – Vyhodnocení závislosti Jouleových ztrát na teplotě pro V441 pro všechna období.....	53
Graf 17 – Porovnání predikce Jouleových ztrát (orientační polynomy) .....	57
Graf 18 – Porovnání predikce absolutní chyby.....	57
Graf 19 – Porovnání predikce ostatních ztrát.....	57
Graf 20 - Predikce Jouleových ztrát v závislosti na teplotě pro V435 .....	58
Graf 21 - Predikce Jouleových ztrát v závislosti na teplotě pro V441 .....	58
Obr. 1 - zapojení přenosové soustavy ČEPS do ENTSO-E .....	12
Obr. 2 - Program výstavby přenosové soustavy 1930 [1] .....	13
Obr. 3 - Schéma vedení 110 kV - rok 1938 [1].....	14
Obr. 4 - Schéma vedení 110 kV - rok 1947 [1].....	14
Obr. 5 – Rozvoj 220 kV vedení po druhé výstavbě [1].....	15
Obr. 6 - Skutečný stav přenosové soustavy 110 kV, 220 kV, 400 kV na území ČSR v roce 1975 [1].	16
Obr. 7 - Schéma rozvodné sítě v ČR [8] .....	18
Obr. 8 - Přípravovaný rozvoj přenosové soustavy do 2030 [7].....	20
Obr. 9 - Ztráty koronou: 1 pěkné počasí, 2 suchý sníh, 3 déšť, 4 jinovatka [3] .....	29
Obr. 10 - Ukázka znečištění a toku svodového proudu po povrchu izolátoru [4].....	30
Obr. 11 - Náhradní schéma jedné fáze střídavého vedení [4] .....	31
Obr. 12 - Ukázka náhradního $\pi$ (pí) článku se zanedbáním svodu [4] .....	32

## Seznam tabulek

Tab. 1 - Vzdělání napětíových úrovní střídavého proudu [1].....	17
Tab. 2 - Seznam zařízení PS v majetku ČEPS [8].....	17
Tab. 3 - Seznam vybraných investičních akcí posilování vedení a rozvedení [9] .....	19
Tab. 4 - Činitelé zatížení $k$ [3].....	25
Tab. 5 - Rozdělení ztrát způsobených jen odporem $R$ [3].....	26
Tab. 6 - Ztráty korónou na km délky vedení o průřezu $400 \text{ mm}^2$ [3].....	27
Tab. 7 - Vhodné vzdálenosti vodičů a průměry vedení [1] .....	28
Tab. 8 - Svodové ztráty na kilometr délky vedení pro danou hladinu napětí [4] .....	31
Tab. 9 - Meze koeficientu korelace [4] .....	35
Tab. 10 - základní parametry vybraných linek.....	39
Tab. 11 - Souhrn dat v databázi podle jednotlivých linek v absolutních i poměrných veličinách v zimě .....	41
Tab. 12 - Souhrn dat v databázi podle jednotlivých linek v absolutních veličinách v zimě .....	41
Tab. 13 - Souhrn dat v databázi podle jednotlivých linek v absolutních i poměrných veličinách na jaře .....	43
Tab. 14 - Souhrn dat v databázi podle jednotlivých linek v absolutních veličinách na jaře .....	43
Tab. 15 - Souhrn dat v databázi podle jednotlivých linek v absolutních i poměrných veličinách v létě .....	45
Tab. 16 - Souhrn dat v databázi podle jednotlivých linek v absolutních veličinách v létě .....	45
Tab. 17 - Souhrn dat v databázi podle jednotlivých linek v absolutních i poměrných veličinách na podzim.....	47
Tab. 18 - Souhrn dat v databázi podle jednotlivých linek v absolutních veličinách na podzim .....	47
Tab. 19 - Výsledné rovnice křivek analyzovaných závislostí pro V435 .....	54
Tab. 20 - Průměrná hodnota relativní odchylky měřených a vypočítaných Jouleových ztrát pro V43554 .....	55
Tab. 21 - Výsledné rovnice křivek analyzovaných závislostí pro V435 .....	55
Tab. 22 - Průměrná hodnota relativní odchylky měřených a vypočítaných Jouleových ztrát pro V43555 .....	56
Tab. 23 - Přesnější predikční křivky polynomiálních funkcí .....	56
Tab. 24 – Polynomy predikčních křivek pro V435 a V441 .....	58

# 1 Úvod

Technické ztráty jsou neoddělitelnou součástí problematiky přenosu elektrické energie nejen na vedeních přenosové soustavy, již od počátků přenosu elektrické energie. Protože prozatím nebyla vyvinuta komerční technologie dopravy elektrické energie od zdroje ke spotřebiteli, je nutné se ztrátami počítat při projektování provozu i údržbě elektrických vedení.

Základním předpokladem pro úspěšné řešení a minimalizaci ztrát elektrické energie je podrobné poznání a pochopení jednotlivých závislostí a faktorů, které ovlivňují chování a provoz elektrických vedení a souvislosti právě se vznikem technických ztrát.

Vhodným základem pro řešení otázky ztrát je získání obsáhlého souboru měřených provozních parametrů alespoň několika vzorových přenosových linek. Jako ideální se jeví použití měřených hodnot za celý rok. Tyto provozní veličiny by měly být měřeny v relativně krátkých časových intervalech, aby bylo možné zachytit pozvolné změny podmínek, které vznik ztrát při přenosu ovlivňují. Je vhodné, aby součástí souboru hodnot byla i základní meteorologická data. Následně bude možné zkoumat vliv nejen vlastního vedení, ale i okolního prostředí.

Cílem práce je stanovení závislostí mezi velikostí ztrát na vedeních přenosové soustavy, především možných vnějších vlivech a závislostech, při využití poznatků nabytých v průběhu studia.

Jde o vlivy a závislosti:

Elektrických parametrů

- Velikost přenášeného výkonu
- Charakter výkonu

Počasí

- Teploty
- Srážky

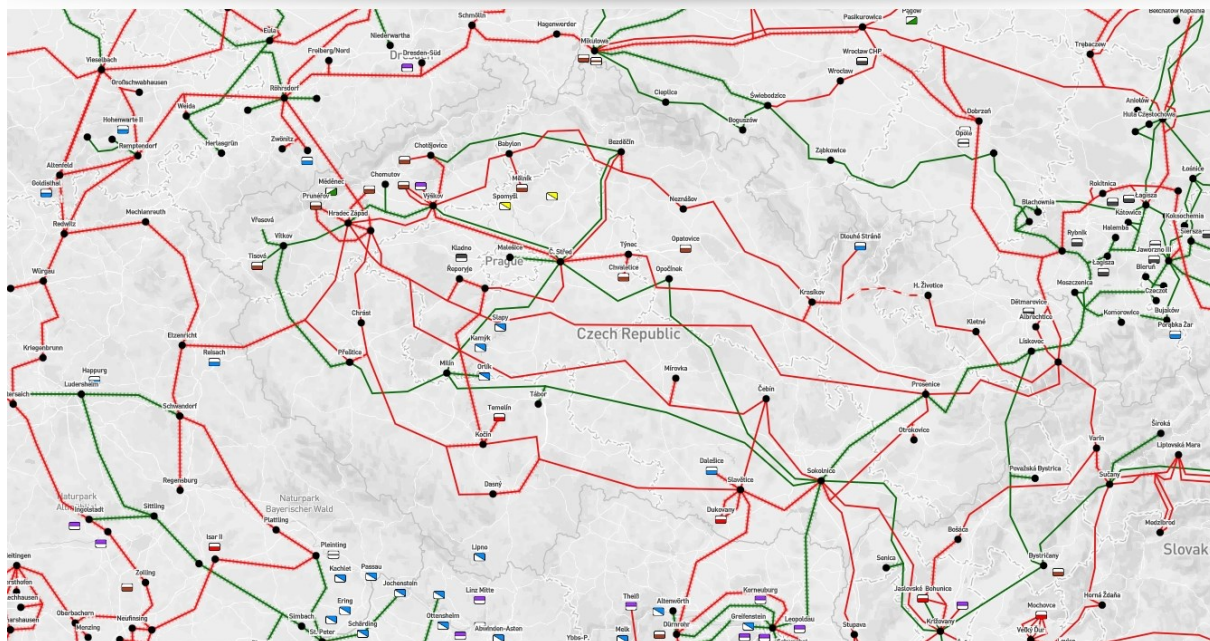
Na velikost ztrát

- Jouleových
- Korónou
- Svodem

V rámci vypracování práce jsem použil reálná data změřená na linkách přenosové soustavy.

## 2 Přenosová soustava ČR

Správce a provozovatelem přenosové soustavy na území České republiky je, v současné době, státní společnost ČEPS a. s. Česká přenosová soustava je součástí panevropské přenosové soustavy sahající od břehů Portugalska po západní část Ukrajiny a pobaltské republiky. Operátor národní přenosové soustavy musí dodržovat odsouhlasený kodex sdružení ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity), ale v rámci svého území je autonomní.



Obr. 1 - zapojení přenosové soustavy ČEPS do ENTSO-E

### 2.1 Historie [1], [6], [7]

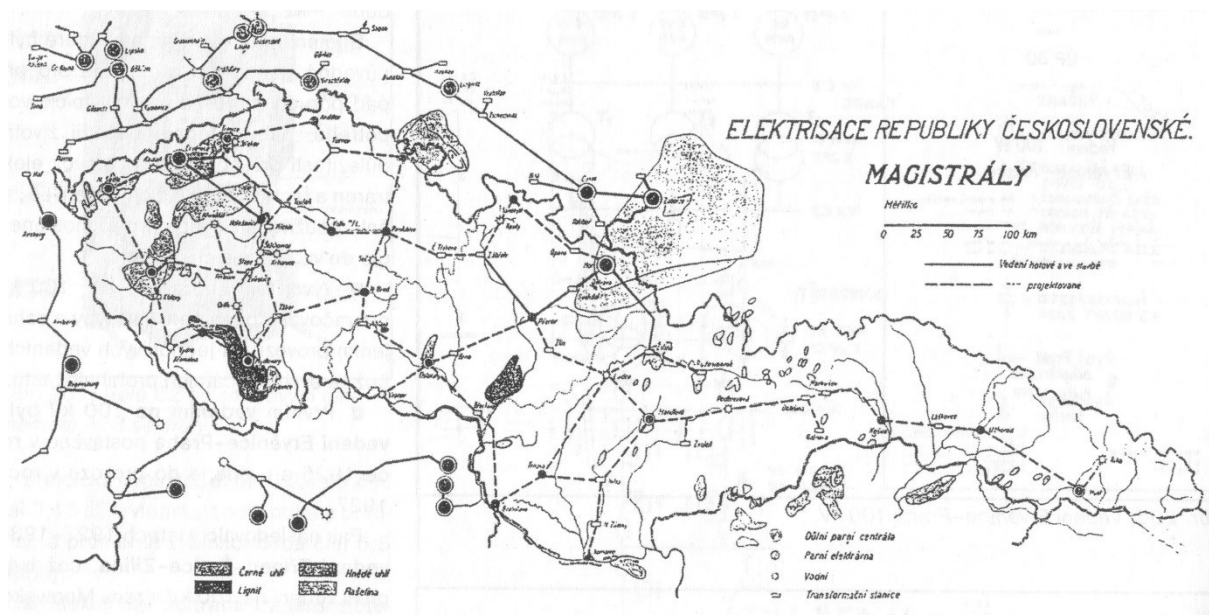
Počátky přenosu střídavého elektrického proudu na větší vzdálenosti spadají do 80. let 19. století. V evropském kontextu zvláště významný je rok 1891, kdy při příležitosti Mezinárodní elektrotechnické výstavy ve Frankfurtu nad Mohanem. Byl uskutečněn přenos z vodní elektrárny v Laufenu na vzdálenost 180 km s přenášeným výkonem 170 kW při napětí 8500 V. Významným milníkem v českých zemích je rok 1905, kdy je jako standart přijat kmitočet 50 Hz.

Rozvoj distribučních a přenosových soustav souvisí s pokrokem na poli elektrotechniky a strojírenství, kdy bylo možné díky novým poznatkům stavět a provozovat stále výkonnější zdroje elektrické energie. S rostoucí velikostí elektráren přestalo být možné stavět je jako součásti městských čtvrtí, nebo na krajích měst. Parní elektrárny byly stavěny blíže zdrojů, nebo distribučních cest (Třebovice, Ervčice), vodní elektrárny na vhodných místech řek. Díky vzdálenosti zdrojů a spotřebičů elektrické energie vznikla potřeba energie co možná nejlevněji a nejefektivněji transportovat. Napětí nejstarších linek bylo 3 – 10 kV, později byly vystavěny nebo rekonstruovány linky 22 – 27 kV. V době budování těchto rozvodů vzniká v ČSR i první koncepce jednotné elektrizační soustavy.

## 100 (110) kV

22. července roku 1919 je přijat zákon č. 438/19 Sb. „O státní podpoře při zahájení soustavné elektrizace“, díky kterému vzniká 25 všeobecných elektrárenských společností. Kterým jsou výnosem ministerstva veřejných prací z 13. září 1920 stanoveny základní podmínky pro provádění soustavné elektrizace. *Tímto výnosem se v celé republice zavádí pro všeobecnou elektrizaci proudová soustava třífázová o 50 Hz a normální napětí pro místní sítě 220/380 V. Pro sítě přespolní napětí 22000 V a pro sítě dálkové 100000 V. Pro generátory bylo určeno napětí 6000 V.*

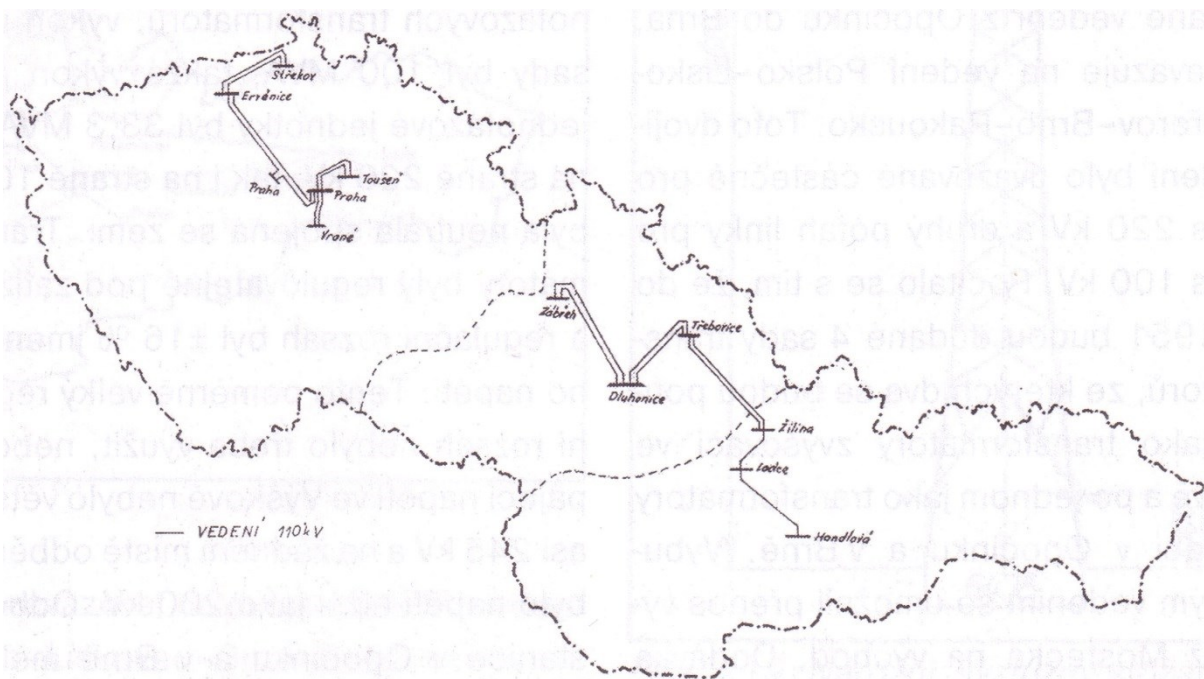
Napětí prvních přenosových sítí se pohybovala v rozmezí 44 – 60 kV. Jejich postupné zvyšování neprobíhalo ve světě stejně, záleželo především na hospodářských potřebách jednotlivých států.



Obr. 2 - Program výstavby přenosové soustavy 1930 [1]

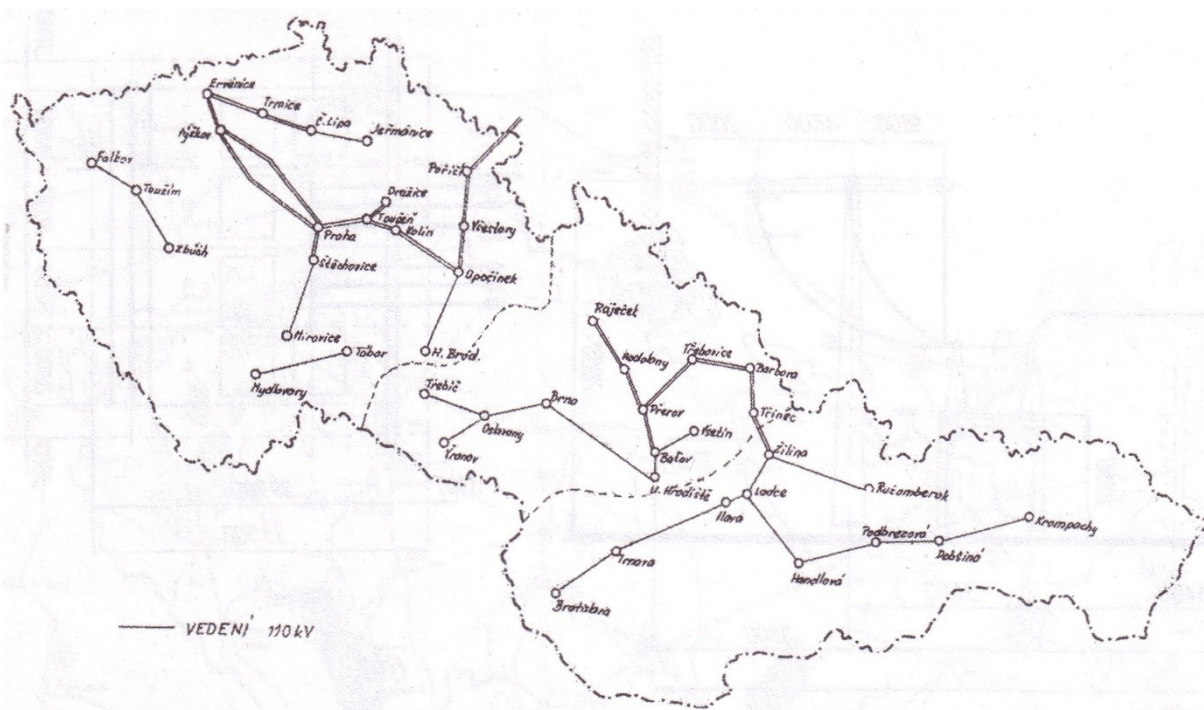
V Československu byl ve smyslu zákona č. 438/19 Sb. vypracován plán soustavné elektrizace státu a navržena síť velmi vysokého napětí, která s určitými změnami platí dodnes. Stavba přenosových linek 100 kV začala v roce 1925 vedením Ervěnice – Holešovice – Vršovice o délce cca 100 km, v roce 1927 následovalo vedení Třinec – Čadca – Žilina a Třinec – Třebovice, poté v roce 1931 Třebovice – Dluhonice – Zábřeh.





Obr. 3 - Schéma vedení 110 kV - rok 1938 [1]

Ve válečných letech vznikají linky vedení na základě požadavků zbrojní výroby a stability dodávky elektrické energie. Tento systém je po osvobození pouze mírně rozšiřován, především v trasách plánovaného propojení do jednotné soustavy. Na území ČSR tehdy pracovalo šest nepropojených přenosových systémů.



Obr. 4 - Schéma vedení 110 kV - rok 1947 [1]

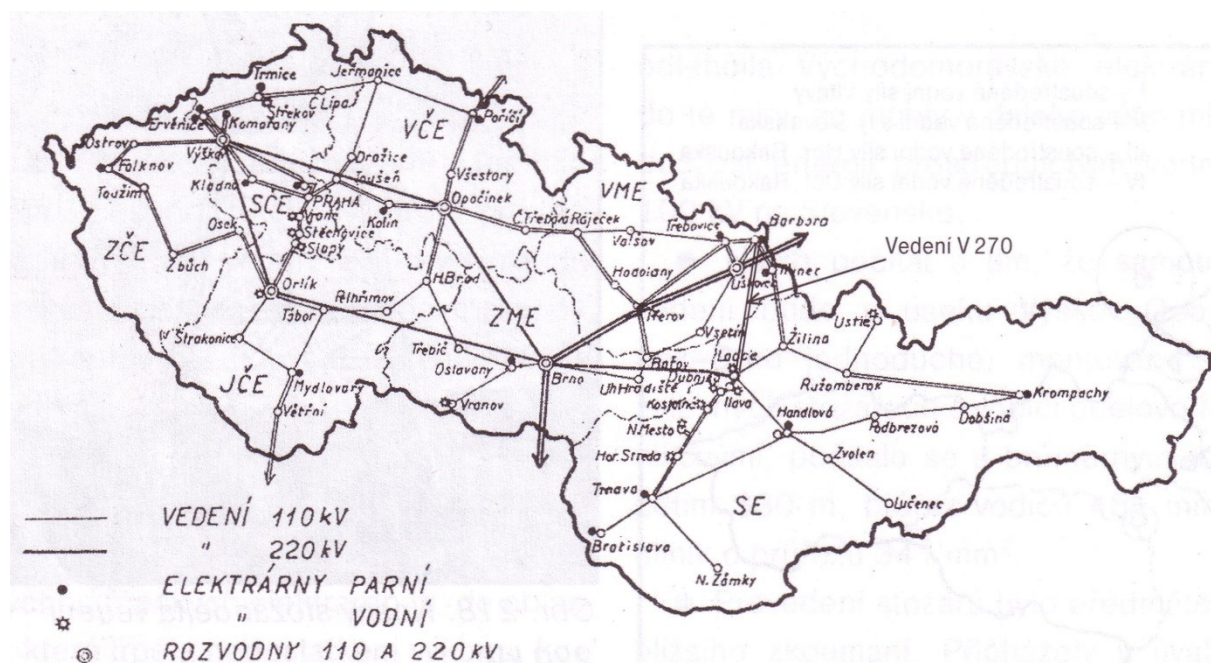
Do konce roku 1953 bylo dokončeno zvýšení provozního napětí ze 100 kV na 110 kV, bez potřeby jakýchkoliv úprav. Propojení jednotlivých částí soustavy do jednotného systému bylo dokončeno roku 1954.

Celý jednotný systém vykazoval mnoho problémů u nás do té doby neznámých a zapříčiněných především velikostí celé soustavy (jako zkratový výkon, stabilita přenosu, regulace napětí, ...) a nepřipraveností účastníků na spolupráci.

## **220 kV**

První plány linek 220 kV začaly vznikat v roce 1940 v rakouské firmě Alpenwerke, roku 1942 byla zahájena realizace projektu, ale do konce války nebyl zcela realizován. Začátek nového plánování rozvodné sítě lze přisoudit poradě v plánovacím odboru ČEZ v říjnu roku 1946. Plán rozvoje počítal s využitím rozestavěné infrastruktury na Moravě a vznikem linek do severních Čech. Důvodem byla nedostatečná přenosová kapacita sítě pro pokrývání nedostatků okamžitých výkonů v oblastech východních Čech, západní Moravy a Slovenska. Plán realizace byl rozdělen do dvou etap. První bylo dobudování a vytvoření páteřních linek napříč státem a druhé posílení přenosových schopností v západně-východním směru se zaústěním vodní elektrárny Orlik do této soustavy.

Vedení bylo v rámci zamýšlených cílů obou etap vybudováno, ale k dalšímu rozvoji nedošlo z důvodu přiklonění se k přenosové hladině napětí 400 kV. Část linek byla dokončena ve stejné době jako první linky vedení 400 kV. Rok 1967 lze považovat za poslední rok významného rozvoje soustavy 220 kV.



Obr. 5 – Rozvoj 220 kV vedení po druhé výstavbě [1]

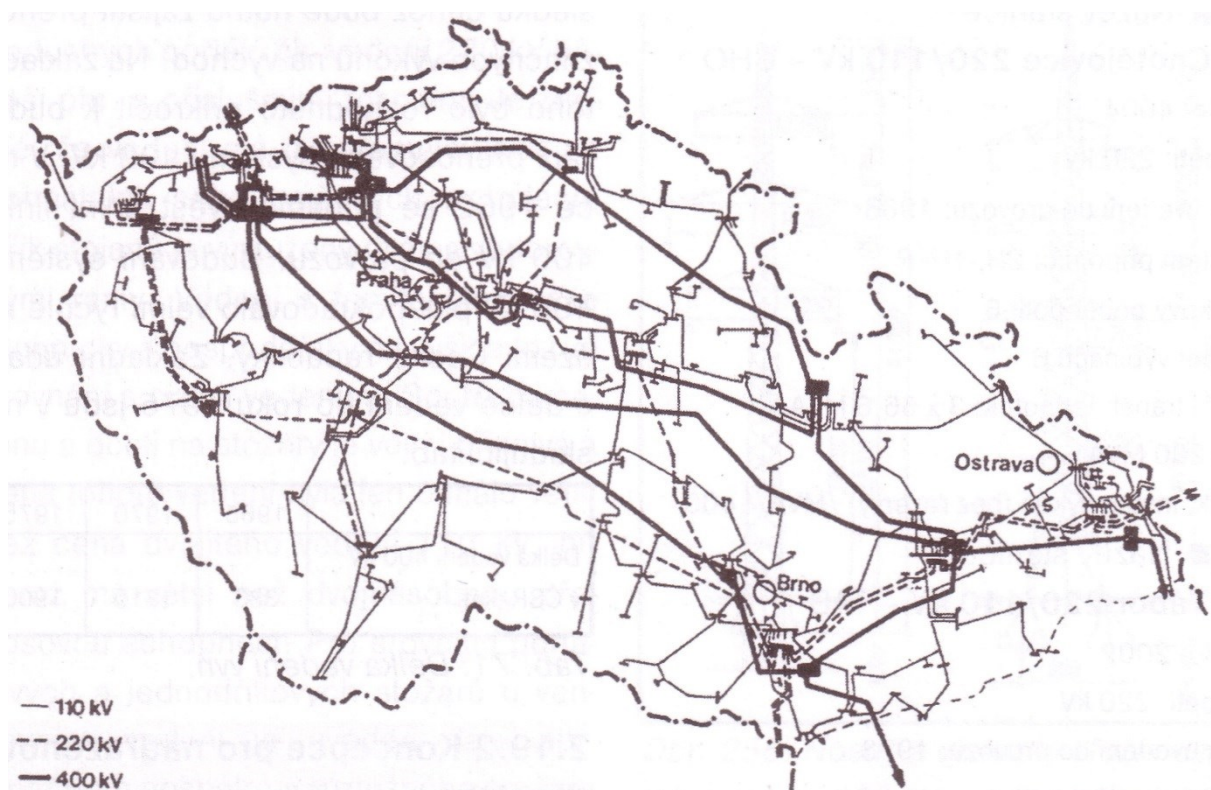


## 400 kV

První úvahy o vybudování nadřazené soustavy 400 kV spadají do roku 1951, jako jeden z možných směrů koncepce. Na základě zahraničních zkušeností ze Švédska a SSSR s konstrukcí a provozem linek s velmi vysokým napětím je v průběhu roku 1953 zorganizován Projekt GE 60, řešící tuto problematiku. Výsledek tohoto projektu poměrně přesně vystihuje budoucí požadavky na elektrizační soustavu ČSR a upřednostňuje použití 380 kV. V průběhu 50. let se objevuje několik studií s různými alternativami, mimo jiné uvažují pouze o síti 220 kV, nebo s použitím 400 kV linek pouze pro přenos na velké vzdálenosti.

První linka vedení 400 kV Hradec – Prosenice je uvedena do provozu v roce 1960. Na základě zkušeností, studií, doporučení zahraničních odborníků, ekonomických aspektů a geografickému rozložení výroby je následně rozhodnuto o stavbě linek 400 kV, jakožto páteční síť elektrizační soustavy ČSR. Nejprve byly budovány transformovny 400/220 kV jako součást již existujících stanic, v pozdějších letech jsou budovány nové stanice přímo 400/110 kV.

Při porovnání vedení 400 kV a 220 kV vychází v nákladech na výstavbu za přenášený MW km lépe soustava vyššího napětí, stejně tak náklady na provoz, respektive velikost činných ztrát na 1 km vedení. Díky použitým vodičům 3 x 450 mm<sup>2</sup> oproti 1 x 450 mm<sup>2</sup> je mnohem vyšší přenosová schopnost vedení. Také možnost zahraniční spolupráce a propojení jednotlivých národních systémů vychází lépe pro linky 400 kV. Nevýhodou linek vyššího napětí jsou napěťové problémy při zapínání vedení naprázdno.



Obr. 6 - Skutečný stav přenosové soustavy 110 kV, 220 kV, 400 kV na území ČSR v roce 1975 [1]

Tab. 1 - Vzrůst napěťových úrovní střídavého proudu [1]

Napětí (kV)								
Stát	44 -60	110 - 130	150	220	400	500	750	1000
Rok zahájení provozu								
Německo	1911	1920		1923				
Francie	1919		1920	1926	1951			
Švýcarsko			1930					
Norsko		1936			1950			
Švédsko				1936	1950			
Anglie		1926						
SSSR		1922		1933		1957	1974	1985
USA		1915		1922	1950	1960	1970	1990
Kanada					1950		1966	1990
Japonsko	1914						1966	1996
ČSR	1912	1925		1953	1963			

## 2.2 Současný stav [8]

Na území České republiky je většina velkých energetických zdrojů vyvedena do přenosové soustavy. Páteřní síť tvoří napěťová soustava 400 kV, která spojuje Českou republiku i se všemi sousedními státy. Nejvíce výroby je soustředěna v oblasti severních Čech, kolem energeticky velmi dobře využitelného hnědého uhlí, odkud je energie distribuována do zbytku země. Dalšími významnými zdroji připojenými do této sítě jsou obě české jaderné elektrárny a přečerpávací vodní elektrárny Dalešice a Dlouhé stráně, které zajišťují stabilitu soustavy.

V současné koncepci je tato síť doplněna linkami 220 kV, u kterých je životnost plánována nejméně do roku 2025. I když již nejsou dále rozšiřovány, jsou důležitým prvkem v případě obnovení soustavy po poruše typu blackout a jsou významné i pro zahraniční spolupráci s Polskem, Rakouskem a Slovenskem.

Na území České republiky je instalováno:

Tab. 2 - Seznam zařízení PS v majetku ČEPS [8]

Popis zařízení	Celkem ČR	Jednotky
Trasy vedení 400 kV	3 008	km
Trasy vedení 220 kV	1 349	km
Trasy vedení 110 kV	45	km
Délka vedení 400 kV	3 510	km
Délka vedení 220 kV	1 909	km
Délka vedení 110 kV	84	km
Zahraniční vedení 400 kV	11	ks
Zahraniční vedení 220 kV	6	ks



## 2.3 Rozvoj [7], [9]

ČEPS je povinná dle zákona č. 458/2000 Sb. mimo jiné zpracovat desetiletý investiční plán rozvoje přenosové soustavy, ke kterému se následně vyjadřuje Ministerstvo průmyslu a obchodu a musí jej schválit Energetický regulační úřad. Současný plán pro roky 2015 – 2025 byl zpracován dle stavu a vstupních dat aktuálních k 30. 9. 2014. Do dalšího rozvoje a modernizace přenosové soustavy je plánováno v následujících letech investovat okolo 5 miliard Kč ročně.

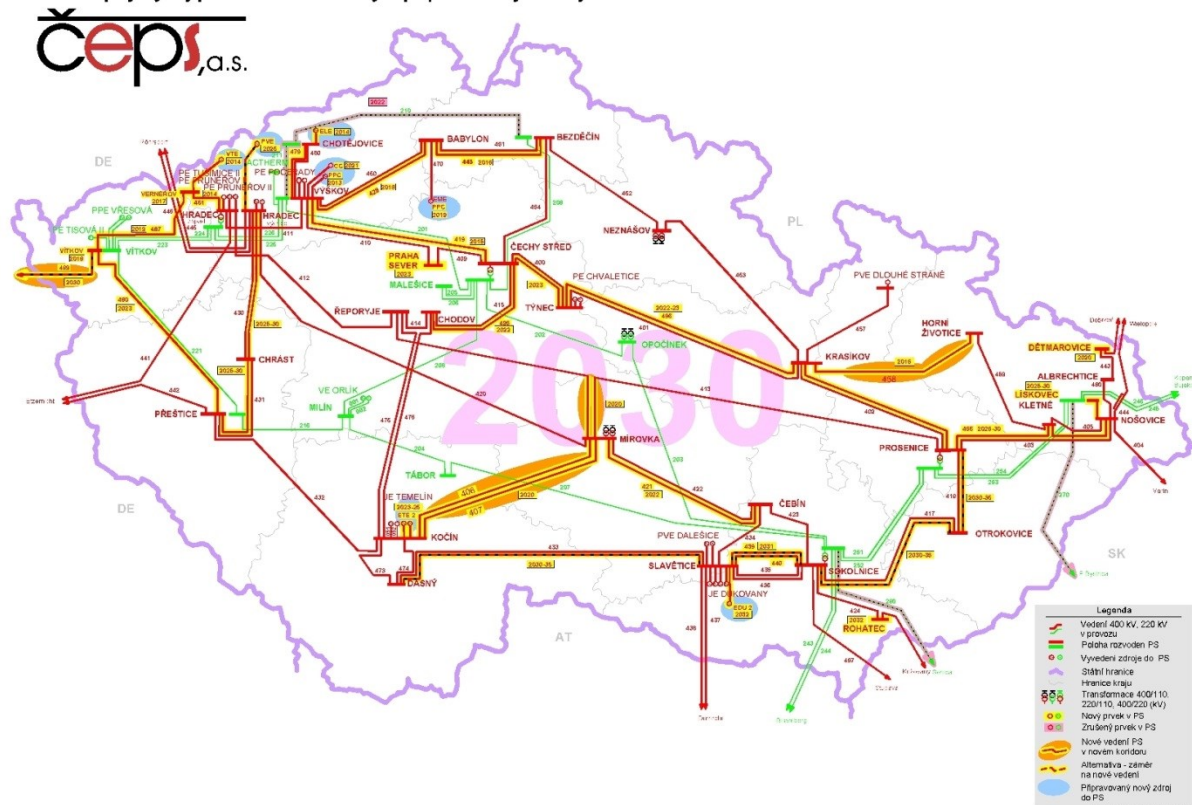
Plánování rozvoje přenosové soustavy je jednou z nezbytných a nepřetržitých činností, díky kterým může být tato soustava udržena v bezproblémovém chodu a zároveň bude připravena pro budoucnost.

Tab. 3 - Seznam vybraných investičních akcí posilování vedení a rozvoden [9]

Název stavby	Délka (km)	Začátek výstavby	Ukončení výstavby
V401/801 Týnec - Krasíkov*	103,8	2021	2023
V402 Krasíkov - Prosenice*	87,6	2024	2025
V403/803 Prosenice - Nošovice*	73	2020	2022
V406/V407 Kočín - Mírovka**	120	2021	2024
V410/V419 Výškov - Čechy Střed*	98,3	2014	2016
V411/811 Hradec - Výškov*	45,3	2023	2024
Zasmyčkování vedení V413 do rozvodny Mírovka**	25	2016	2017
V415 Chodov - Čechy Střed*	35,1	2023	2024
V431/831 Chrást - Přeštice*	32,6	2024	2025
Zasmyčkování vedení V443/V449 do rozvodny Dětmárovice**	1,2	2020	2020
V450/V428 Výškov - Babylon*	72,5	2018	2020
V451/V448 Babylon - Bezděčín*	54	2016	2017
Zasmyčkování V803 do rozvodny Kletné**	29,1	2023	2024
V458 Krasíkov - Horní Životice**	79,3	2014	2016
V487/V488 Verněřov - Vítkov**	75	2021	2023
V490/V491 Přeštice - Vítkov**	87	2018	2020
Rozvodna Čebín, komplexní rekonstrukce	-	2013	2015
Rozvodna Čechy střed, komplexní rekonstrukce	-	2012	2017
Rozvodna Dětmárovice, nová rozvodna 400 kV	-	2018	2020
Rozvodna Hradec, nový phaseshiftrový transformátor	-	2015	2016
Rozvodna Kočín, komplexní rekonstrukce	-	2016	2020
Rozvodna Lískovec, komplexní rekonstrukce	-	2012	2016
Rozvodna Mírovka, komplexní rekonstrukce	-	2012	2015
Rozvodna Mírovka, rozšíření rozvodny	-	2016	2020
Rozvodna Otrokovice, komplexní rekonstrukce	-	2015	2018
Rozvodna Praha-Sever, nová rozvodna 400 kV	-	2023	2025
Rozvodna Slavětice, komplexní rekonstrukce	-	2023	2024
Rozvodna Verněřov, nová rozvodna 400 kV	-	2015	2017
Rozvodna Vítkov, nová rozvodna 400 kV	-	2018	2020
* Zdvojení stávajícího vedení, ** Nové vedení 400 kV			

Koncepce rozvoje se orientuje především na zajištění spolehlivosti přenosových služeb, obnovu stávajících zařízení na základě sledování jejich provozních parametrů a včasného určení konce životnosti a rozvoj přenosové soustavy v národním i mezinárodním kontextu. Vzhledem ke geografické poloze České republiky v rámci Evropy je nutné počítat s posilováním jak tuzemských, tak přeshraničních propojení pro zajištění stabilní elektrizační soustavy v rámci sdružení ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity), které plány národních operátorů koordinuje.

Postupný vývoj přenosové soustavy – připravovaný rozvoj PS do 2030



Obr. 8 - Připravovaný rozvoj přenosové soustavy do 2030 [7]

Současný investiční plán ČEPS zahrnuje posílení vedení ve směru sever-jih, posílení přenosových vedení z oblasti severočeských hnědouhelných elektráren směrem na východ a řešení přetoků elektrické energie ze zahraničí díky novým trendům ve výrobě a volnému obchodu s touto komoditou na burzách v EU.

### 3 Metodika výpočtu technických ztrát, predikce ztrát

Ztráty při přenosu elektrické energie je možné rozdělit na technické a netechnické (obchodní). Z technologického pohledu vznikají v přenosové soustavě obchodní ztráty především nepřesností měření. Černé odběry na úrovních napětí přenosové soustavy lze s jistotou vyloučit.

Problematika přesnosti měřicích přístrojů nesouvisí pouze s netechnickými ztrátami. Protože je velmi náročné vytvořit přesný model soustavy, nebo alespoň linky pro výpočet a predikci technických ztrát, a popsat v jeho rámci všechny varianty. Zdá se pro výpočet a následnou predikci ztrát vytvořit rozsáhlou databázi měření z minulosti a tu neustále aktualizovat. Pro tuto databázi budou nejdůležitější přesná měření jak elektrických, tak neelektrických veličin. Z neelektrických veličin se bude jednat o meteorologická data, měřená po určitých vzdálenostech v průběhu celé linky. Jedině tak je možné zohlednit možné změny počasí podél celé linky.

Technické ztráty jsou dány fyzikálními vlastnostmi přenosové cesty elektrické energie z výroby až ke spotřebiteli.

#### 3.1 Technické ztráty [1], [3], [4], [11]

Je zřejmé, že při výrobě, přenosu i výrobě elektrické energie není možné, na základě současných technických možností, vytvořit zařízení, které bezezbytku spotřebuje veškerou dodanou energii. Ve všech prvcích této soustavy je nutné počítat s energií, kterou nebude žádným způsobem možné využít – to jsou ztráty. Je to rozdíl mezi dodanou a využitou energií.

$$W_1 > W_2 \quad (\text{kWh, kWh}) \quad (3.1)$$

$W_1$	energie dodaná do zařízení	(kWh)
$W_2$	energie odebraná ze zařízení	(kWh)

$$\Delta W = W_1 - W_2 \quad (\text{kWh}) \quad (3.2)$$

$\Delta W$	ztráty energie v zařízení	(kWh)
$W_1$	energie dodaná do zařízení	(kWh)
$W_2$	energie odebraná ze zařízení	(kWh)

Ztráty je možné určit dvěma způsoby:

- Přímě z naměřených hodnot z provozu zařízení.
- Nepřímě výpočtem, založeným buď na měřených hodnotách jiných veličin, nebo na teoretických základech fyzikálních zákonů vytvořených modelech, případně kombinací obou variant.

Přeměna a doprava energie probíhá v jednotlivých prvcích systému. Část dodané energie se přitom vždy přemění na jinou formu energie. Užitek, kterého je možné dosáhnout, se udává poměrem energie získané k energii dodané – to je účinnost zařízení.

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} 100 \quad (\%) \quad (3.3)$$

$\eta$       účinnost      (%)

$W_1$       energie dodaná do zařízení      (kWh)

$W_2$       energie odebraná ze zařízení      (kWh)

Hlavním důvodem výstavby a provozu energetické přenosové a distribuční soustavy je zásobovat elektrickou energií jednotlivé odběratele – plátce celého systému. Aby bylo možné spotřebovanou elektrickou energii účtovat úměrně spotřebě, je nutné ji (z její povahy) v reálném čase měřit. Měření je nejjednodušší provádět na místě styku jednotlivých prvků soustavy. Ztráty elektrické energie lze vyjádřit:

$$\Delta W = \sum_1^n W_g - \sum_1^n W_v - \sum_1^n W_o \quad (\text{kWh}) \quad (3.4)$$

$\Delta W$       ztráty energie      (kWh)

$W_g$       energie vyrobená ve všech zdrojích soustavy      (kWh)

$W_v$       energie vlastní spotřeby při výrobě a přenosu      (kWh)

$W_o$       energie odebraná spotřebitelem      (kWh)

Odběratel však nezaplatí pouze část odebrané energie. Ta je navýšena o faktické technické ztráty v jednotlivých prvcích a také vlastní spotřebu technického vybavení jednotlivých stanic po cestě přenosu.

## Rozdělení technických ztrát [11]

Technické ztráty jsou způsobeny fyzikálními účinky elektrické energie. Technické ztráty zahrnují:

- Jouleovy ztráty na vedeních, kabelech a transformátorech
- ztráty korónou
- ztráty svodovými proudy (venkovních vedení)
- ztráty v dielektriku (kabelová vedení)
- ztráty transformátorů naprázdno
- spotřeba měřicích, řídicích a spojovacích prvků
- vlastní spotřebu elektrických stanic

Podle místa původu se technické ztráty dělí na:

- ztráty způsobené transformací
- ztráty ve vodičích
- ztráty případné (kompenzací, nedokonalou izolací atd.)

Technické ztráty elektrické energie v rozvodu a vnitřním rozvodu elektrické energie se člení na:

- ztráty stálé, které jsou dány provedením a parametry provozovaných zařízení
- ztráty proměnlivé, které jsou ovlivněny velikostí přenášeného výkonu

### 3.1.1 Jouleovy ztráty

Jouleovy ztráty vznikají ve všech prvcích elektrizační soustavy a při všech úrovních napětí. Jsou zároveň největší částí všech vznikajících ztrát. Při průchodu proudu jakýmkoliv reálným vodičem vzniká vlivem odporu tohoto vodiče teplo, které je dané druhou mocninou procházejícího proudu. Odpor vodiče je dán chemickými a fyzikálními vlastnostmi materiálu. Elektrický odpor je dán především počtem volných proudonosičů – u kovů elektronů ve struktuře látky. V elektrotechnice jsou nejpoužívanějšími materiály vodičů měď (Cu), hliník (Al) a různé formy železa (Fe).

Odpor vodiče:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (\Omega) \quad (3.5)$$

$R$	odpor vodiče	$(\Omega)$
$\rho$	měrný odpor vodiče	$(\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1})$
$l$	délka vedení	$(\text{m})$
$S$	průřez vedení	$(\text{mm}^2)$



Velikost odporu vodiče není konstantní, ale je ovlivněna teplotou okolí. Při průchodu proudem dochází k oteplení vodiče a k růstu jeho odporu až do dosažení rovnovážného stavu. Základní hodnota elektrického odporu daného materiálu se uvádí při 20°C, součinitel  $\alpha$  charakterizuje závislost změny s měnící se teplotou.

Teplotní závislost odporu vodiče:

$$R_{\vartheta} = R_{20}(1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \quad (\Omega) \quad (3.6)$$

$R_{\vartheta}$      odpor vodiče při teplotě  $\vartheta$      ( $\Omega$ )

$R_{20}$      odpor vodiče při 20°C     ( $\Omega$ )

$\alpha$      teplotní součinitel odporu     ( $K^{-1}$ )

$\Delta\vartheta$      rozdíl teplot     (K)

Při dané teplotě má daný materiál daný odpor. Z hlediska velikosti odporu je možné materiály rozdělit:

- Izolanty
- Polovodiče
- Vodiče
- Supravodiče

V současné přenosové soustavě společnosti ČEPS jsou pro výkonová zařízení soužící k přenosu elektrické energie používány pouze vodiče a izolanty.

Velikost ztrát při přenosu elektrické energie je ukazatelem hospodárnosti provozu celé soustavy. Pro jednu fázi jsou dány výrazem:

$$\Delta P = k R I^2 \cdot 10^{-3} \quad (\text{kW}) \quad (3.7)$$

$\Delta P$      výkonové ztráty     (kW)

$k$      činitel zatížení     (-)

$R$      odpor vedení     ( $\Omega$ )

$I$      protékající proud     (A)

Nebo dosazením:

$$I^2 = \frac{P^2}{3U^2 \cos^2 \varphi} \quad (\text{A}) \quad (3.8)$$

$I$  proud (A)

$P$  výkon (W)

$U$  sdružené napětí (V)

$\cos \varphi$  účinník (-)

Potom:

$$\Delta P = kR \frac{P^2}{3U^2 \cos^2 \varphi} \cdot 10^{-3} \quad (\text{kW}) \quad (3.9)$$

$\Delta P$  výkonové ztráty (kW)

$k$  činitel zatížení (-)

$R$  odpor vedení ( $\Omega$ )

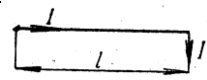

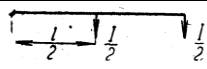
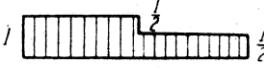
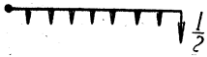

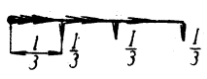
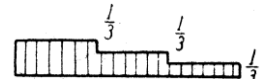
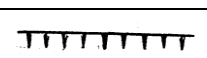

$P$  výkon (kW)

$U$  sdružené napětí (kV)

$\cos \varphi$  účinník (-)

Kde  $k$  je konstanta – činitel zatížení, který respektuje rozložení odběrů po délce vedení. U jednotlivých linek přenosové soustavy je realizován pouze odběr na konci vedení. Vybrané hodnoty činitele jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 4 - Činitelé zatížení  $k$  [3]

Schéma sítě	Rozložení zatížení	$k = \frac{3 \cdot \sum I_x^2 \cdot l}{I^2 \cdot l}$
		3
		1,88
		1,75
		1,55
		1

Pro celou soustavu o  $n$  zařízeních vypadá vzorec:

$$\Delta P = \sum_{x=1}^{x=n} k R_x I_x^2 \cdot 10^{-3} \quad (\text{kW}) \quad (3.10)$$

Pro všechna tří fázová vedení v soustavě:

$$\Delta P = 3 \cdot \sum_{x=1}^{x=n} k R_x I_x^2 \cdot 10^{-3} \quad (\text{kW}) \quad (3.11)$$

Následující tabulka ukazuje rozložení Jouleových ztrát v celé elektrizační soustavě:

Tab. 5 - Rozdělení ztrát způsobených jen odporem R [3]

Typ	Druh	Přibližný odpor R [ $\Omega$ ]	Ztráty $\Delta P$		
			kW		%
Generátor	Generátor 20 MVA	0,005	50	50	2,1
Transformátory	Transformátor VN/VVN	$\frac{0,01/0,07}{1,3/1,6}$	300	480	20,5
	Transformátor VN/NN	$\frac{120}{0,4}$	180		
Vedení	Vedení VVN	12,5	450	1650	71
	Vedení VN (5 vývodů)	5x(10 až 15)	700		
	Vedení NN (asi 500 obcí)	3 až 12	500		
Motory (odběr)	Různé motory 0,5 až 1000 kW	0,4 až 15	150	15	6,4
Součet				2330	100

Jak je vidět, nejproblémovějšími prvky v síti jsou právě zařízení pro přenos a distribuci energie, proto je zde také kladen největší důraz na přesné měření a zmenšování ztrát.

### 3.1.2 Ztráty korónou

Při řešení technických ztrát na vedeních přenosové soustavy je nutné brát v úvahu ztráty způsobené korónou. Koróna je neúplný samostatný elektrický výboj vznikající při překročení určité intenzity elektrického pole v daném dielektrickém prostředí. Ztráty způsobuje při počátečním napětí 21 kV/cm (pěkné počasí, kulatý vodič). Projevuje se tzv. „sršením“ a v temném prostředí pozorovatelným tmavě fialovým zabarvením a za vlhkého počasí zvýšenou mírou koroze.

Dielektrické vlastnosti vzduchu jsou definovány především atmosférickými podmínkami v daném místě, které mají značný vliv na velikost ztrát korónou.

Rozlišují se tyto druhy počasí:

- Pěkné počasí bez měřitelných srážek
- Déšť (včetně mokrého sněhu)
- Suchý sníh
- Jinovatka
- Mlha při viditelnosti pod 1000 m

Tabulka ukazuje ztráty korónou na jednotlivých napěťových hladinách přenosové soustavy při vybraném stavu počasí:

Tab. 6 - Ztráty korónou na km délky vedení o průřezu 400 mm<sup>2</sup> [3]

Napětí (kV)	Pěkné počasí (kW·km <sup>-1</sup> )	Déšť (kW·km <sup>-1</sup> )	Jinovatka (kW·km <sup>-1</sup> )
110	0	0	0,8
220	0,3	6	25
400	4	40	80

Počáteční napětí koróny „Peekův vztah“ [4]:

$$U_0 = 21,1 \cdot \delta \cdot m_1 m_2 r \cdot \ln \frac{d}{r} \quad (\text{kV}) \quad (3.12)$$

$U_0$  počáteční napětí koróny (kV)

$\delta$  relativní hustota vzduchu (-)

$m_1$  vliv povrchu vodiče (-)

$m_2$  vliv počasí (-)

$r$  poloměr vodiče (cm)

$d$  střední vzdálenost vodiče (cm)

kde

$m_1 = 1$  pro hladký lesklý vodič

$m_1 = 0,98 - 0,92$  zvětralé a drsné vodiče

$m_1 = 0,87 - 0,82$  pro lana

$m_2 = 1$  pro suché počasí

$m_2 = 0,8$  deštivé a vlhké počasí

$$d = \sqrt[3]{d_{12}d_{13}d_{23}} \quad (\text{cm}) \quad (3.13)$$

$d$  střední vzdálenost vodiče (cm)

$d_{xy}$  vzdálenost jednotlivých vodičů (cm)

$$r_e = \sqrt{r \cdot a^{(n-1)}} \quad (\text{cm}) \quad (3.14)$$

$r_e$  ekvivaletní poloměr (cm)

$r$  poloměr lana ve svazku (cm)

$a$  počet lan ve svazku (cm)

$$\delta = \frac{p}{101,3} \cdot \frac{273 + 20}{273 + \vartheta} \quad (-) \quad (3.15)$$

$\delta$  (-) relativní hustota vzduchu vzhledem k teplotě 20 °C a tlaku 101,324 kPa

$p$  (kPa) tlak vzduchu

$\vartheta$  (°C) teplota vzduchu

Za pěkného počasí nastává koróna pouze na vedeních o napětí 110 kV do průřezu 70 mm<sup>2</sup> a 220 kV a vyšším. Za špatného počasí jsou postižena vedení o napětí 110 kV do průřezu 95 mm<sup>2</sup> a všech vyšších napěťových úrovních.

Vhodné vzdálenosti vodičů a průměry lan vedení pro podmínky České republiky, jež nemají sršet, jsou:

Tab. 7 - Vhodné vzdálenosti vodičů a průměry vedení [1]

Jmenovité napětí $U$ (kV)	110	220	400
Vzdálenost vodičů $a$ (cm)	300	460	800
Průměr lan (cm)	1,2	2,9	5

Ztráty korónou [4]:

$$\Delta P_k = k(U_f - U_0) \cdot 10^{-5} \quad (\text{W} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.16)$$

$\Delta P_k$  ztráty korónou  $(\text{W} \cdot \text{km}^{-1})$

$k$  koeficient  $(-)$

$U_f$  fázová hodnota napětí  $(\text{kV})$

$U_0$  počáteční napětí koróny  $(\text{kV})$

kde

$$k = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{d}} \quad (-) \quad (3.17)$$

$k$  koeficient  $(-)$

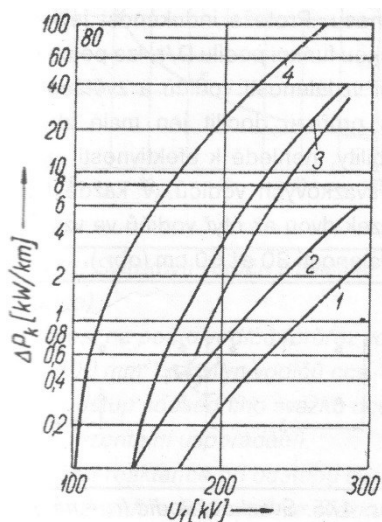
$\delta$  relativní hustota vzduchu  $(-)$

$f$  frekvence  $(\text{Hz})$

$r$  poloměr vodiče  $(\text{cm})$

$d$  střední vzdálenost vodiče  $(\text{cm})$

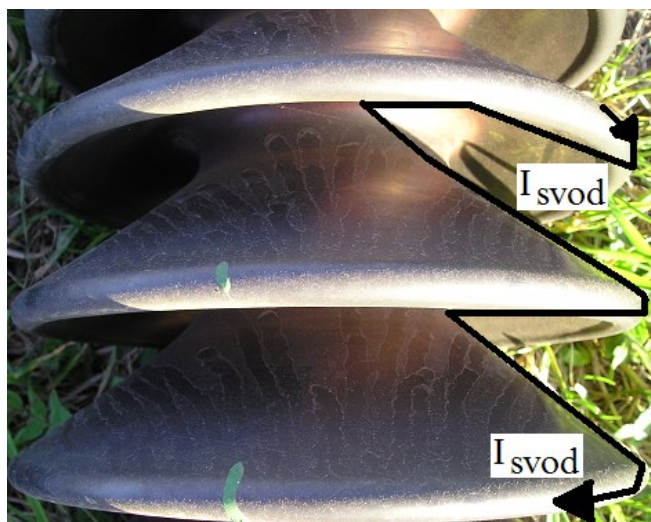
Měřené průběhy ztrát korónou na vedení trojsvazkem ACY – 400/40:



Obr. 9 - Ztráty korónou: 1 pěkné počasí, 2 suchý sníh, 3 déšť, 4 jinovatka [3]

### 3.1.3 Ztráty svodem

Ztráty svodem jsou charakteristickým parametrem vedení VVN a ZVN. Jsou dány fyzikálními vlastnostmi reálných izolantů, protože není možné vyrobit a provozovat materiál s nekonečně velkým odporem. Každý izolant určité množství proudu ve skutečnosti propustí, nejvíce se tak děje na povrchu izolačního prvku, který je ovlivňován okolním prostředím.



Obr. 10 - Ukázka znečištění a toku svodového proudu po povrchu izolátoru [4]

Svodový proud je možné všeobecně vyjádřit [4]:

$$I_{svod} = \frac{U_f}{R_i} = U_f \cdot G \quad (A) \quad (3.18)$$

$I_{svod}$  proud (A)

$U_f$  fázové napětí (V)

$R_i$  odpor izolace ( $\Omega$ )

$G$  svod (S)

Svod má charakter činné zátěže. Výpočtem je poměrně těžké jej určit. V běžných podmínkách se určují měřeními za provozu a není možné je vyjádřit obecně. Liší se podle stavu a charakteru zařízení použitým lince v daném úseku vedení a jsou velmi ovlivněny počasím v celé délce linky.

Ztráty svodem lze zjednodušeně vypočítat:

$$\Delta P_s = U_s^2 \cdot G_s \quad (\text{W} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.19)$$

$\Delta P_s$  ztráty svodem  $(\text{W} \cdot \text{km}^{-1})$

$U_s$  sdružené napětí  $(\text{V})$

$G_s$  svodová vodivost  $(\text{S} \cdot \text{km}^{-1})$

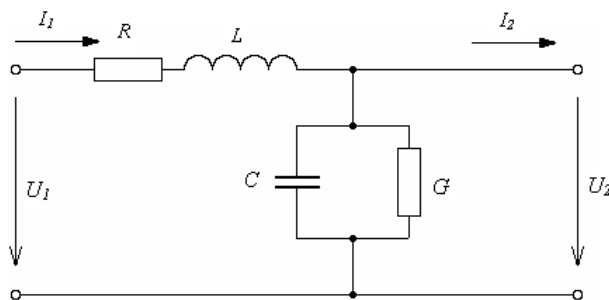
Měřené hodnoty svodových ztrát na jednotlivých napěťových hladinách nabývají hodnot:

Tab. 8 - Svodové ztráty na kilometr délky vedení pro danou hladinu napětí [4]

Napětí [kV]	110	220	400
Ztráty svodem [ $\text{W} \cdot \text{km}^{-1}$ ]	70 – 3600	120 – 770	160 – 1400

### 3.1.4 Výpočty střídavých vedení

Pro výpočty všech druhů střídavých vedení, a zvláště především VVN a ZVN, je využíváno schéma náhradního čtyřpólu. Vzorce definují výpočet parametrů na počátku tohoto čtyřpólu a využívají Blondelových konstant. Náhradní schéma respektuje existenci čtyř základních parametrů vedení: odpor, indukčnost, kapacitu a svod.



Obr. 11 - Náhradní schéma jedné fáze střídavého vedení [4]

Rovnice parametrů na začátku čtyřpólu:

$$\overline{U}_1 = \overline{A} \cdot \overline{U}_2 + \overline{B} \cdot \overline{I}_2 \quad (\text{V}; -, \text{V}, -, \text{A}) \quad (3.20)$$

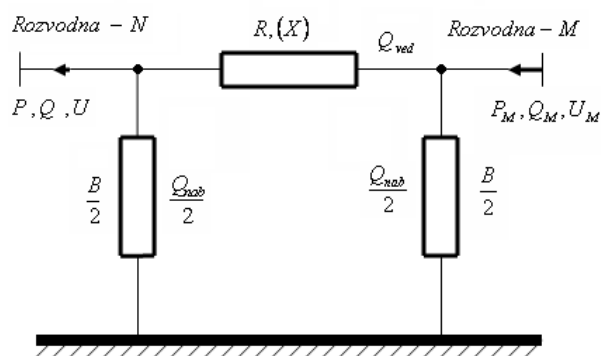
$$\overline{I}_1 = \overline{C} \cdot \overline{U}_2 + \overline{D} \cdot \overline{I}_2 \quad (\text{A}; -, \text{V}, -, \text{A}) \quad (3.21)$$

Kde A, B, C, D jsou Blondelovy konstanty.



Aby bylo možné vypočítat model vedení pomocí náhradního schématu přesně a respektovat při výpočtu kontinuální změnu jednotlivých parametrů, je nutné vedení rozdělit na  $n$  stejně dlouhých úseků

– elementů délky. Protože je výpočet pomocí elementů délky velmi náročný a zdoluhavý i v současné době, používají se stále náhradní články. Ty za cenu určité nepřesnosti zjednodušují a zrychlují výpočet. V praxi jsou využívány především „T“, „Π“, „Γ“ a Steimetzův článek.



Obr. 12 - Ukázka náhradního  $\pi$  (pi) článku se zanedbáním svodu [4]

Z uvedeného náhradního článku je možné odvodit rovnici pro výpočet Jouleových ztrát při zanedbání svodu ( $G = 0$ ) [4]

$$\Delta P = R \cdot \frac{P^2 + \left( Q - \frac{U^2 \cdot B}{2} \cdot 10^{-6} \right)^2}{U^2} \quad (\text{MW}) \quad (3.22)$$

$\Delta P$	Jouleovy ztráty	(MW)
$R$	odpor vedení	( $\Omega$ )
$P$	přenášený činný výkon	(MW)
$Q$	přenášený jalový výkon	(Mvar)
$U$	sdužené napětí v místě odběru	(kV)
$B$	susceptance vedení	( $\mu\text{S}$ )
$10^{-6}$	koeficient umožňující použít uvedené jednotky	

Rovnici lze rozepsat na ztráty způsobené činným a jalovým výkonem:

Jouleovy ztráty způsobené činným výkonem [4]

$$\Delta P_{\chi} = \frac{R \cdot P^2}{U^2} \quad (\text{MW}) \quad (3.23)$$

Jouleovy ztráty způsobené jalovým výkonem [4]

$$\Delta P_j = \frac{R \cdot \left( Q - \frac{U^2 \cdot B}{2} \cdot 10^{-6} \right)^2}{U^2} \quad (\text{MW}) \quad (3.24)$$

Poznámka:

Hodnoty  $P$ ,  $Q$ ,  $U$  dosazujeme z příslušného uzlu přenosové soustavy, kde u konkrétního vedení počítáme ztráty. Při výpočtu činných ztrát se zohledňují znaménka toku výkonů vzhledem k obecnému uzlu. Podle úmluvy je-li  $P > 0$  činný výkon vtéká do uzlu a naopak. Znaménko jalového výkonu pak určuje, zda jde o výkon induktivní či kapacitní. Pro  $P > 0$  (zdroj výkonu) platí, že  $Q > 0$  je induktivní jalový výkon. Pro  $P < 0$  (odběr výkonu) platí, že  $Q < 0$  je induktivní jalový výkon. [4]

### 3.2 Predikce ztrát

Technické ztráty, závisí na velikosti přenášeného výkonu, aktuálním stavu počasí po celé délce linky, stavu využívaném infrastrukturou a provozními vlivy, jak ukazují způsoby výpočtu výše. Aby bylo možné úspěšně predikovat ztráty na vedeních, je nutné mít k dispozici predikci vývoje spotřeby elektrické energie v celé síti a její rozložení na jednotlivé linky přenosové soustavy.

Obě zmíněné problematiky predikce lze provést následujícími způsoby:

- Matematickým modelem
- Statistickou analýzou měřených provozních dat
- Kombinací obou výše zmíněných možností

Matematický model může být volitelně složitý. Základním předpokladem je, že zvýšením složitosti bude i přesnější ale také náročnější na výpočet. Je možné jej postavit na teoretických předpokladech, vlastnostech a znalostech, nebo alespoň částečně na datech z praxe. Každé zjednodušení způsobí určité navýšení nepřesností a odchylek od skutečného stavu. Je ale možné modelovat a predikovat v podstatě i jakoukoli možnou situaci. Je například možné predikovat situaci při extrémním počasí, které může vyústit až v destrukci prvku (prvků) soustavy s následným rozpadem sítě.

Statistická analýza měřených provozních dat předpokládá pro úspěšné řešení obsáhlou databázi. Čím větší vzorek dat v této databázi bude, tím přesněji je možné predikovat budoucí stav. Predikce vychází spolehlivěji tím víc, čím jednodušší vztah zkoumanými veličinami je. Omezení této metody je dáno omezenými záznamy databáze. Není například možné spolehlivě předvídat situaci, pro kterou nejsou v databázi záznamy. Velmi přesně a spolehlivě lze například předpokládat křivky denního zatížení celé elektrizační soustavy.

Kombinací modelu a analýzy lze například s určitou přesností pokrýt stavy, pro které v databázi nejsou záznamy, ale vývoj dat určitým směrem je možné předpokládat.

### Parametry databáze

Databáze pro predikci technických ztrát na vedeních přenosové soustavy by měla obsahovat základní elektrické parametry jednotlivých linek, jako přenášený výkon, proud, napětí, ... a (vzhledem k výše popsanému postupu výpočtu) také základní meteorologické údaje měřené po určitých vzdálenostech v celém průběhu linky. Vhodné je zaznamenávat v těchto úsecích především teplotu, tlak, intenzitu a typ srážek a případně viditelnost.

## 4 Vybrané statistické pojmy použité při řešení [4], [12]

### 4.1 Regresní analýza

Regresní analýzu lze chápat jako vystižení charakteru závislosti mezi dvěma zkoumanými veličinami a odhad chování jedné, při znalosti chování druhé. Pro co možná nejpřesnější určení odhadu je nutný výběr vhodného matematického zápisu zkoumané závislosti. Vzhledem k možné náročnosti výpočtů je doporučeno volit co možná nejjednodušší funkci, která splňuje požadavky přesnosti.

Rovnice funkcí vhodných pro výběr:

přímka 
$$y = a + b \cdot x \quad (4.1)$$

kvadratická funkce 
$$y = a + b \cdot x + c \cdot x^2 \quad (4.2)$$

polynom 3. řádu 
$$y = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + d \cdot x^3 \quad (4.3)$$

polynom n-tého řádu 
$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_i \cdot x^i \quad (4.4)$$

exponenciální funkce 
$$y = a \cdot b^x \quad (4.5)$$

### 4.2 Koeficient determinace

Koeficient determinace  $R^2$  je možné zobrazit v MS Excel spolu s funkcí spojnice trendu a její rovnicí. Udává kvalitu regresního modelu. Přesněji, kolik procent rozptylu zkoumané proměnné je vysvětleno spojnici trendu a kolik zůstalo nevysvětleno.

### 4.3 Koeficient korelace

Koeficient korelace  $k_{xy}$  udává míru závislosti mezi členy statistického souboru podobně jako koeficient determinace. Je možné jej dopočítat například podle následujícího vzorce:

$$k_{xy} = \sqrt{R^2} \quad (4.6)$$

Tab. 9 - Meze koeficientu korelace [4]

velikost $k_{xy}$ (platí i pro $R^2$ )	koeficient nabývá hodnot od -1 do 1 včetně
$k_{xy} = 0$	neexistuje závislost
$ k_{xy}  < 0,5$	slabý stupeň závislosti
$ k_{xy}  > 0,5$	významný stupeň závislosti
$0,5 <  k_{xy}  < 0,9$	vysoký stupeň závislosti
$k_{xy} = \pm 1$	lineární závislost mezi hodnotami

#### 4.4 Aritmetický průměr

Je to součet  $n$  hodnot jedné veličiny, vztažený k celkovému počtu jejich hodnot.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.7)$$

$n$  je počet hodnot

$x_i$  hodnota veličiny

#### 4.5 Medián

Dělí soubor hodnot na dvě poloviny. Platí, že nejméně 50% hodnot je menších nebo rovných a nejméně 50 % hodnot je větších nebo rovných mediánu. Na rozdíl od aritmetického průměru není ovlivněn extrémní hodnoty.

#### 4.6 Absolutní chyba

Absolutní chyba je algebraický rozdíl dvou hodnot (v tomto případě měřená minus vypočítaná). Vychází ve stejných jednotkách dané veličiny.

$$\Delta x = x_m - x_v \quad (4.8)$$

$x_m$  měřená hodnota

$x_v$  vypočtená hodnota

#### 4.7 Relativní chyba

Je poměr absolutní chyby k porovnávané hodnotě. Určuje míru přesnosti získané hodnoty v %.

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x_n} \cdot 100 \quad (\%) \quad (4.9)$$

$\Delta x$  absolutní chyba

$x_n$  referenční hodnota

Pokud je relativní chyba počítána jako absolutní hodnota, jsou hodnoty omezeny pouze na kladné a zvýší se počet vzorků, ale je nutné hodnotu uvádět jako  $\pm \delta_x$  %.

## 5 Rozbor databází vybraných měřených hodnot

Databáze byly poskytnuty z informačních systémů společnosti ČEPS, a.s., pokrývají 4 vybraná období, která přibližně odpovídají jednotlivým ročním dobám a jejich specifickým.

### 5.1 Popis databáze

Databáze obsahuje měření elektrických veličin z provozu přenosové soustavy v roce 2014. Měřené hodnoty jsou uloženy vždy v intervalu 15 minut. Měření jednotlivých hodnot, příslušejících dané lince, je prováděno měřicími přístroji pouze v rozvodné stanici. Ke každé lince jsou k dispozici hodnoty na začátku a na konci vedení. V databázi jsou uvedeny hodnoty: přenášeného činného výkonu, přenášeného jalového výkonu, napětí a proudu vedením. Vyhodnocovány jsou také činné ztráty při přenosu na příslušné lince.

Meteorologická data obsažená v databázi jsou zastoupena pouze měřeními teploty v koncových bodech jednotlivých linek a to pouze na území České republiky. Hodnoty ze zahraničních stanic přeshraničních linek v poskytnuté databázi obsaženy nejsou. Interval měření odpovídá intervalu měření elektrických veličin, tedy každých 15 minut.

### 5.2 Úpravy poskytnutých dat

Sloučením poskytnutých exportů dat z informačních systémů jsem získal databázi obsahující 11900 řádků naměřených hodnot. Po základních úpravách a formátování pro jednodušší orientaci jsem provedl kontrolu hodnot v řádcích. K tomu poslouží například funkce vyhledání extrému, která u nesmyslných dat nevrátí hodnotu, ale vypíše chybu. Takto jsem našel tři řádky, u kterých byl uveden pouze údaj času, nikoli hodnoty. Zjevně se jedná o chyby systémů, ze kterých byla data exportována, proto jsem tyto řádky vynechal.

Po doplnění teplot z rozvodu k jednotlivým linkám, jsem si vybral linky, data z databáze vydělil a vytvořil samostatné soubory, které jsem doplnil o další vzorce potřebné k provedení analýzy (popsáno dále).

### 5.3 Předpoklad chyb

#### Měřicí přístroje

Každý přístroj pracuje a zaznamenává data s určitou nepřesností, kterou je po určité době provozu nutné překontrolovat a přístroj případně znovu překalibrovat, aby měřil v mezích povolené odchylky. Při elektronickém záznamu analogových veličin v digitální podobě dochází ke zkreslení veličiny vzorkováním, kvantizačním krokem a možným šumem v signálu. To může způsobit značné nepřesnosti při měření malých hodnot. Nízké hodnoty napětí a proudu ale nejsou standardními provozními parametry, je tedy možné předpokládat pouze chybu nepřesnosti přístroje a i tu lze v rámci výskytu dalších chyb zanedbat.

S měřenými veličinami je při analýze počítáno jako s absolutními, chyba měření není uvažována. Lze předpokládat, že

### **Použitý sw**

Pro práci s databází jsem použil tabulkový procesor Microsoft Excel z balíku Microsoft Office. Tento program počítá čísla s přesností na 15 míst. Určitá chyba výpočtu může vzniknout i zde. Protože v databázi nejsou příliš velká čísla, respektive již při tvorbě databáze je využito násobných jednotek a nepřesnost měřících přístrojů bude vzhledem k přesnosti výpočtu rozhodně vyšší, je možné chyby dané sw pro výpočet zanedbat.

### **Postup výpočtů**

Vzhledem k použitému postupu a metodice výpočtu je jisté, že vznikne určitá nepřesnost daná zjednodušením výpočtu.

Například jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, je při výpočtu Jouleových ztrát zanedbána svodová vodivost. Dle údajů uvedených v (4) tvoří svodové ztráty maximálně 0,02 % celkových ztrát. Svod je proto možné bez většího vlivu na výsledky zanedbat.

### **Absence vstupních dat**

Společnost ČEPS, a.s. neprovádí na linkách přenosové soustavy měření meteorologických dat. Jako zdroj těchto dat je model zpracovaný Českým hydrometeorologickým ústavem, výstup z tohoto modelu není součástí poskytnuté databáze. Protože vliv počasí se značně podílí na vzniku výsledných ztrát a je zahrnut v uvedených výpočtových vzorcích, lze se značnou jistotou předpokládat vznik nepřesností a odchylek od měřených dat. Například podle výsledků výpočtů (4) mohou mít ztráty korónou značný podíl na celkových ztrátách na vedení.

Pokud nejsou k dispozici teploty z úseků linky, nelze vedení rozdělit na elementy, které by více zohlednily vznik a vývoj ztrát. (Problematika vlivu teploty bude dále rozebrána u jednotlivých linek.)

Vlivem absence vstupních dat lze předpokládat největší podíl na vzniku výsledné chyby analýzy a predikce.

## **5.4 Analyzované linky**

Pro analýzu jsem se rozhodl vybrat si dvě linky s rozdílnou vstupní chybou zapříčiněnou měřením teploty.

### **V435**

Linka V435 se nachází na jižní Moravě. Spojuje rozvodné stanice v katastrálním území obcí Sokolnice a Slavětice. Prochází nížinatým terénem využívaným ve značné míře k zemědělství. Vedení je v celé délce samostatné. Vzhledem k jednotvárnosti krajiny a relativně krátké vzdálenosti, lze u této linky pravděpodobně nejvíce minimalizovat chybu danou omezením měření teploty a absence dalších meteorologických dat.

Výpočet teploty:

Rozvodny jsou od sebe vzdušnou čarou vzdáleny cca 42,5 km, vedení má délku 55,665 km. I když variabilita počasí může být na této vzdálenosti značná, lze krom vlivu lokálních srážek počítat s relativně stejným (podobným) počasím. Maximální rozdíl teplot v databázi je po zaokrouhlení (nahoru) 9 °C. Teplota pro výpočet je získána jako průměr hodnot v obou rozvodnách a použita na celou linku.

Pro rozbor a analýzu jsem zvolil rozvodnu Sokolnice, zkratka: SOK.

### V441

Linka V441 spojuje českou přenosovou soustavu se soustavou německou. Vede z rozvodny Hradec (západ) do rozvodny Etzenricht. Vedení má délku 162,692 km, rozvodny jsou od sebe (vzdušnou čarou) vzdáleny cca 117,5 km. Vedení má část trasy společnou s linkou V442.

Výpočet teploty:

Pro V441 je dostupná pouze teplota v české rozvodně Hradec, proto nelze použít ani aproximaci teplot z obou rozvodn. Vzhledem ke značné délce vedení ani není možné počítat s jednotným stavem počasí v průběhu celé trasy. Z tohoto důvodu lze očekávat značnou odchylku způsobenou vlivem teploty na výpočet, analýzu a predikci pro tuto linku.

Pro rozbor a analýzu jsem zvolil rozvodnu Hradec (západ), zkratka: HRA.

Následující tabulka obsahuje základní parametry vybraných linek.

Tab. 10 - základní parametry vybraných linek

Linka	Rozvodna A	Rozvodna B	$l_{\text{vedení}}$ (km)	$l_{\text{rozvoden}}$ (km)	$I_{\text{max}}$ (A)	U (kV)	$S_{\text{max}}$ (MVA)
V435	Sokolnice	Slavětice	55,665	42,5	1968	400	1363,47
V441	Hradec (západ)	Etzenricht (D)	162,692	117,5	1968	400	1363,47

Pro získání přesnějšího pohledu následuje zobrazení výkonových poměrů na obou přenosových linkách s krátkým komentářem.

*Poznámka k použitým symbolům v následujících podkapitolách:*

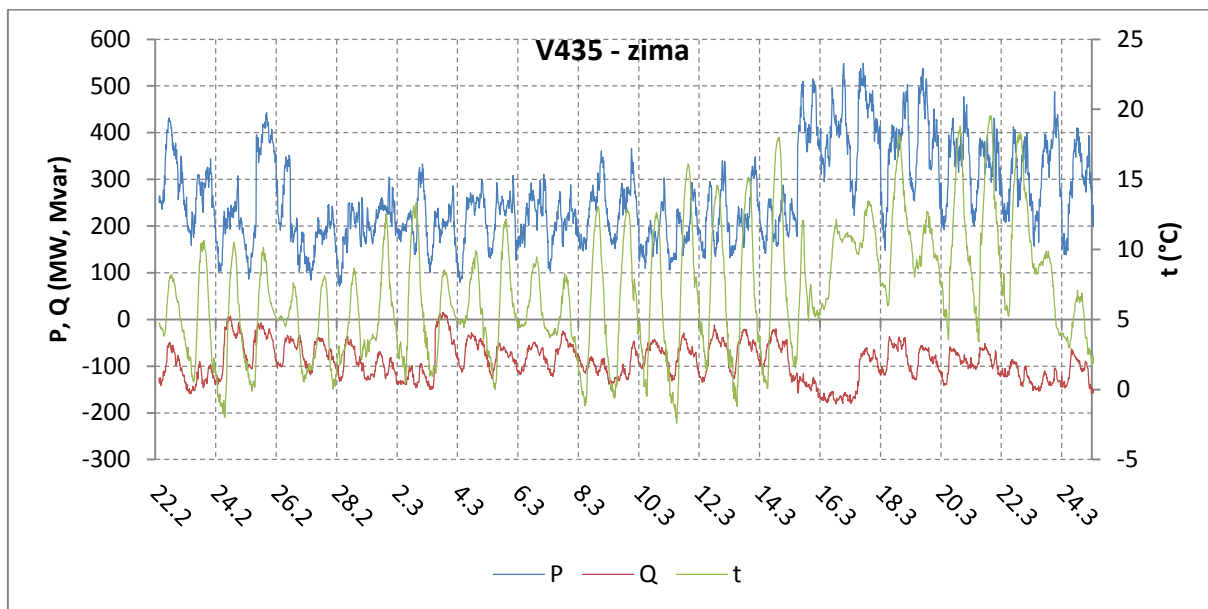
*Dolní index u značky veličiny symbolizuje použitou funkci.*

*dP označuje ztráty činného výkonu, které jsou původní hodnotou v databázi.*



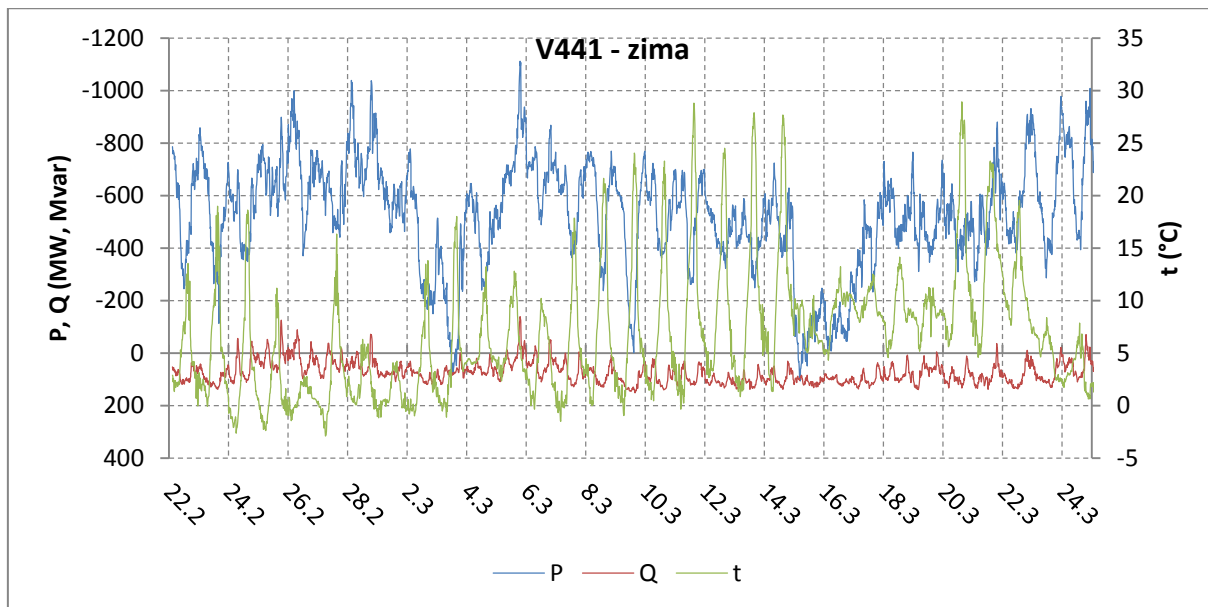
#### 5.4.1 Zima (22. 2. – 25. 3. 2014)

Období od 22. 2. 2014 do 25. 3. 2014 bude z důvodu zkrácení názvů a popisů dále označováno jako „zima“, neboť téměř celé do tohoto ročního období spadá. Předpokladem pro toto období jsou nízké teploty a minimum deštivých srážek. Naopak lze předpokládat sněžení a námrazu, teoreticky způsobující největší technické ztráty, mimo ztrát Jouleových.



Graf 1 - měřené přenosy výkonů a teplota, V435 v zimě

Graf 1 zobrazuje zatížení linky V435 v zimním období. Začátek a konec sledované doby je možné charakterizovat zvýšenými přenosy výkonu.



Graf 2 - měřené přenosy výkonů a teplota, V441 v zimě

Graf 2 ukazuje 2 období sníženého přenosu výkonu. V těchto obdobích je možné pozorovat několik špiček přenosu převážně v nočních hodinách a několik propadů přenosu kolem poledne. Anomálie záznamu dat nejsou zřejmé. Průběh přenosů se jeví být s určitou odchylkou předvídatelný.

Tabulky zobrazující data v tomto ročním období získaná pomocí deskripčních statistických metod v absolutních i poměrných veličinách:

Tab. 11 - Souhrn dat v databázi podle jednotlivých linek v absolutních i poměrných veličinách v zimě

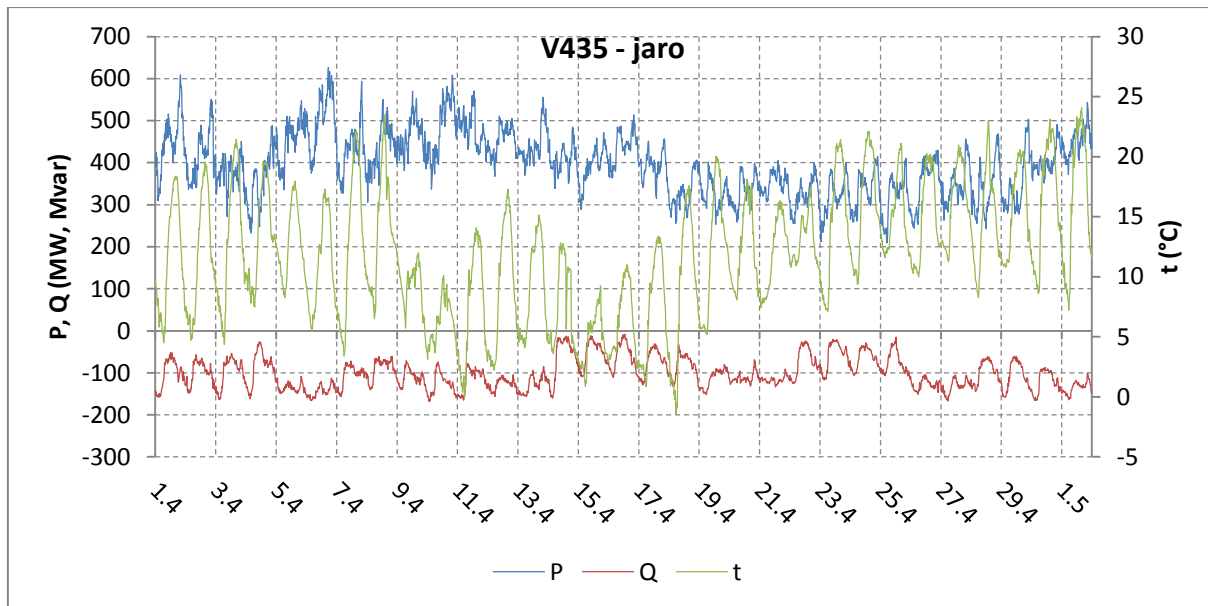
zima	Absolutní veličiny			Poměrné veličiny												
		V435	V441	V435	V441											
P <sub>max</sub>	(MW)	548,70	1111,39	40,24	81,51	(%)	S <sub>max</sub>									
P <sub>průměr</sub>	(MW)	262,54	769,20	19,26	56,41	(%)	S <sub>max</sub>									
P <sub>medián</sub>	(MW)	241,64	541,73	17,72	39,73	(%)	S <sub>max</sub>									
P <sub>min</sub>	(MW)	71,46	0,00	5,24	0,00	(%)	S <sub>max</sub>									
dP <sub>max</sub>	(MW)	2,65	26,81	0,483	2,413	(%)	P <sub>max</sub>									
dP <sub>průměr</sub>	(MW)	0,70	6,38	0,265	0,829	(%)	P <sub>průměr</sub>									
dP <sub>medián</sub>	(MW)	0,53	5,90	0,220	1,089	(%)	P <sub>medián</sub>									
dP <sub>min</sub>	(MW)	0,00	0,00	<table><tr><td>dP/P (%)</td><td>max</td><td>průměr</td></tr><tr><td>V 435</td><td>0,505</td><td>0,243</td></tr><tr><td>V 441</td><td>2,423</td><td>1,061</td></tr></table>				dP/P (%)	max	průměr	V 435	0,505	0,243	V 441	2,423	1,061
dP/P (%)	max	průměr														
V 435	0,505	0,243														
V 441	2,423	1,061														
t <sub>max</sub>	(°C)	19,54	28,93													
t <sub>průměr</sub>	(°C)	6,91	6,70													
t <sub>medián</sub>	(°C)	6,35	5,61													
t <sub>min</sub>	(°C)	-2,41	-2,90													
Δt <sub>max</sub>	(°C)	7,75	nelze													

Tab. 12 - Souhrn dat v databázi podle jednotlivých linek v absolutních veličinách v zimě

zima		V435	V441
$Q_{\max}$	(Mvar)	181,40	150,65
$Q_{\text{průměr}}$	(Mvar)	90,30	77,10
$Q_{\text{medián}}$	(Mvar)	92,26	80,81
$Q_{\min}$	(Mvar)	0,47	0,00
$U_{\max}$	(kV)	419,14	417,60
$U_{\text{průměr}}$	(kV)	415,16	412,47
$U_{\text{medián}}$	(kV)	415,15	413,28
$U_{\min}$	(kV)	410,64	0,00

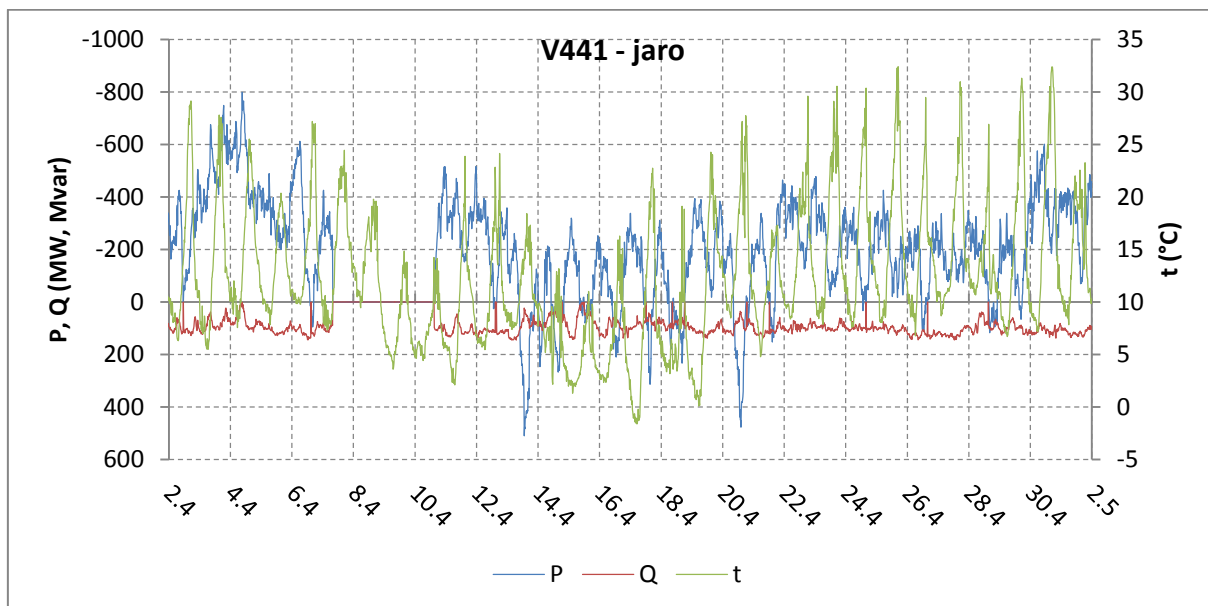
### 5.4.2 Jaro (1. 4. – 2. 5. 2014)

Období od 1. 4. 2014 do 2. 5. 2014 bude z důvodu zkrácení názvů nadále popisováno jako „jaro“. Předpokladem pro toto období je, oproti zimě nárůst teplot a poměrně časté srážky. Oproti zimě je také možné předpokládat snížení technických ztrát o ztráty korónou a také mírný nárůst Jouleových ztrát.



Graf 3 - měřené přenosy výkonů a teplota, V435 na jaře

Přenosy na lince V435 je možné považovat za téměř ustálené, až na výjimku 6. 4. 2016 nejsou v přenosech překvapivé změny.



Graf 4 - měřené přenosy výkonů a teplota, V441 na jaře

Vývoj na lince V441 je poněkud zajímavější. Výkon již neteče jednosměrně jako v zimě. Linka je od 7. 4. 8:45 do 10. 4. 14:45 vypnutá. Databáze hodnot sice obsahuje měření i v tomto čase, ale hodnoty jsou velmi nízké, v podstatě nulové.

Tabulky zobrazující data v tomto ročním období získaná pomocí deskripčních statistických metod v absolutních i poměrných veličinách:

Tab. 13 - Souhrn dat v databázi podle jednotlivých linek v absolutních i poměrných veličinách na jaře

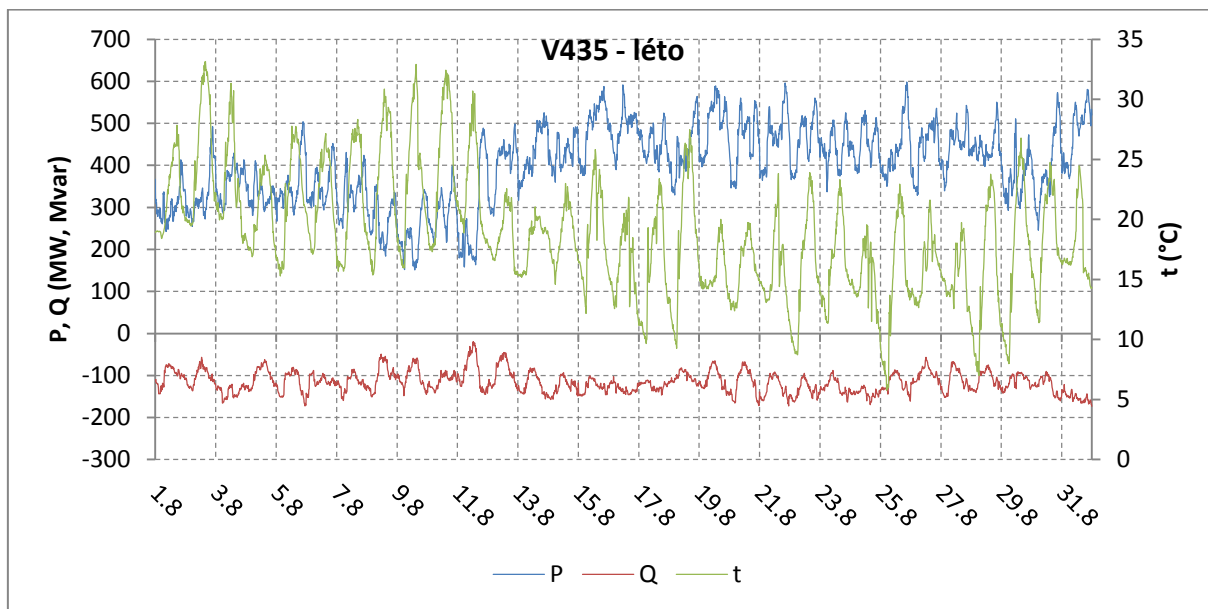
jaro	Absolutní veličiny			Poměrné veličiny												
		V435	V441	V435	V441											
P <sub>max</sub>	(MW)	626,60	798,13	45,96	58,54	(%)	S <sub>max</sub>									
P <sub>průměr</sub>	(MW)	395,33	211,52	28,99	15,51	(%)	S <sub>max</sub>									
P <sub>medián</sub>	(MW)	392,98	200,53	28,82	14,71	(%)	S <sub>max</sub>									
P <sub>min</sub>	(MW)	208,79	0,00	15,31	0,00	(%)	S <sub>max</sub>									
dP <sub>max</sub>	(MW)	3,08	12,05	0,492	1,510	(%)	P <sub>max</sub>									
dP <sub>průměr</sub>	(MW)	1,42	1,45	0,360	0,812	(%)	P <sub>průměr</sub>									
dP <sub>medián</sub>	(MW)	1,37	0,87	0,348	0,462	(%)	P <sub>medián</sub>									
dP <sub>min</sub>	(MW)	0,00	0,00	<table><tr><td>dP/P (%)</td><td>max</td><td>průměr</td></tr><tr><td>V 435</td><td>0,528</td><td>0,351</td></tr><tr><td>V 441</td><td>2,647</td><td>0,467</td></tr></table>				dP/P (%)	max	průměr	V 435	0,528	0,351	V 441	2,647	0,467
dP/P (%)	max	průměr														
V 435	0,528	0,351														
V 441	2,647	0,467														
t <sub>max</sub>	(°C)	24,07	32,40													
t <sub>průměr</sub>	(°C)	11,80	12,27													
t <sub>medián</sub>	(°C)	11,68	11,00													
t <sub>min</sub>	(°C)	-1,44	-1,60													
Δt <sub>max</sub>	(°C)	8,96	nelze													

Tab. 14 - Souhrn dat v databázi podle jednotlivých linek v absolutních veličinách na jaře

jaro		V435	V441
$Q_{\max}$	(Mvar)	168,00	144,66
$Q_{\text{průměr}}$	(Mvar)	101,21	86,83
$Q_{\text{medián}}$	(Mvar)	106,04	98,27
$Q_{\min}$	(Mvar)	7,79	0,00
$U_{\max}$	(kV)	419,72	418,32
$U_{\text{průměr}}$	(kV)	414,18	367,44
$U_{\text{medián}}$	(kV)	414,19	413,28
$U_{\min}$	(kV)	409,71	0,00

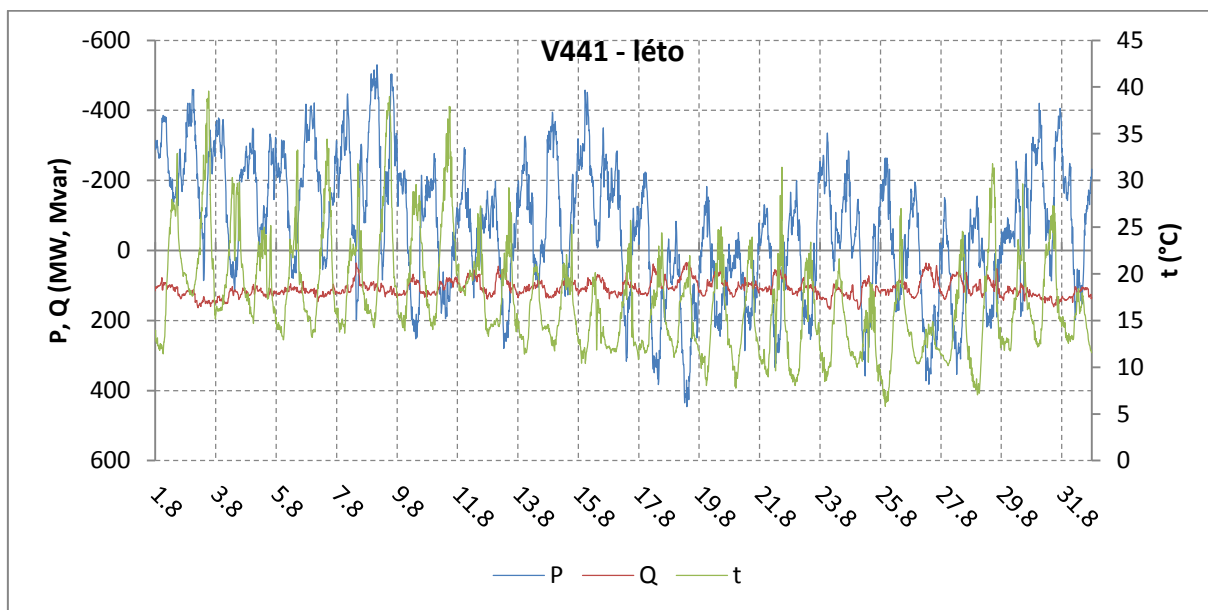
### 5.4.3 Léto (1. 8. – 1. 9. 2014)

Období od 1. 8. 2014 do 1. 9. 2014 bude z důvodu zkrácení názvů nadále označováno jako „léto“. Předpokladem je, právě zde budou v databázi obsaženy nejvyšší hodnoty teplot. V létě je očekávatelný nízký úhrn srážek a s ním spojené minimální ztráty korónou a svodem, ale také nárůst Jouleových ztrát.



Graf 5 - měřené přenosy výkonů a teplota, V435 v létě

U přenosů výkonů na V435 dochází ke změně pouze pozvolna, vývoj přenosů lze charakterizovat jako předvídatelný, mírný pokles oproti průměrným hodnotám nastává pouze kolem 10. 8., mírný nárůst je pozorovatelný na konci zobrazeného období.



Graf 6 - měřené přenosy výkonů a teplota, V441 v létě

Na rozdíl od V435 jsou na V441 toky výkonu oběma směry téměř vyvážené. Odpovídají pravděpodobně vývoji situace v propojené elektrizační soustavě. Je možné, že jsou spojeny s přetoky energie z Německa, což může naznačovat i výskyt jednotlivých špiček.

Tabulky zobrazující data v tomto ročním období získaná pomocí deskripčních statistických metod v absolutních i poměrných veličinách:

Tab. 15 - Souhrn dat v databázi podle jednotlivých linek v absolutních i poměrných veličinách v létě

léto	Absolutní veličiny			Poměrné veličiny												
		V435	V441	V435	V441											
P <sub>max</sub>	(MW)	598,17	529,76	43,87	38,85	(%)	S <sub>max</sub>									
P <sub>průměr</sub>	(MW)	398,92	163,78	29,26	12,01	(%)	S <sub>max</sub>									
P <sub>medián</sub>	(MW)	408,14	150,65	29,93	11,05	(%)	S <sub>max</sub>									
P <sub>min</sub>	(MW)	151,27	0,00	11,09	0,00	(%)	S <sub>max</sub>									
dP <sub>max</sub>	(MW)	2,92	5,81	0,488	1,097	(%)	P <sub>max</sub>									
dP <sub>průměr</sub>	(MW)	1,41	0,85	0,353	1,320	(%)	P <sub>průměr</sub>									
dP <sub>medián</sub>	(MW)	1,41	0,51	0,345	0,719	(%)	P <sub>medián</sub>									
dP <sub>min</sub>	(MW)	0,00	0,00	<table><tr><td>dP/P (%)</td><td>max</td><td>průměr</td></tr><tr><td>V435</td><td>0,513</td><td>0,339</td></tr><tr><td>V441</td><td>6,982</td><td>0,429</td></tr></table>				dP/P (%)	max	průměr	V435	0,513	0,339	V441	6,982	0,429
dP/P (%)	max	průměr														
V435	0,513	0,339														
V441	6,982	0,429														
t <sub>max</sub>	(°C)	33,15	39,58													
t <sub>průměr</sub>	(°C)	18,86	17,16													
t <sub>medián</sub>	(°C)	18,40	16,13													
t <sub>min</sub>	(°C)	5,77	5,80													
Δt <sub>max</sub>	(°C)	nelze	nelze													

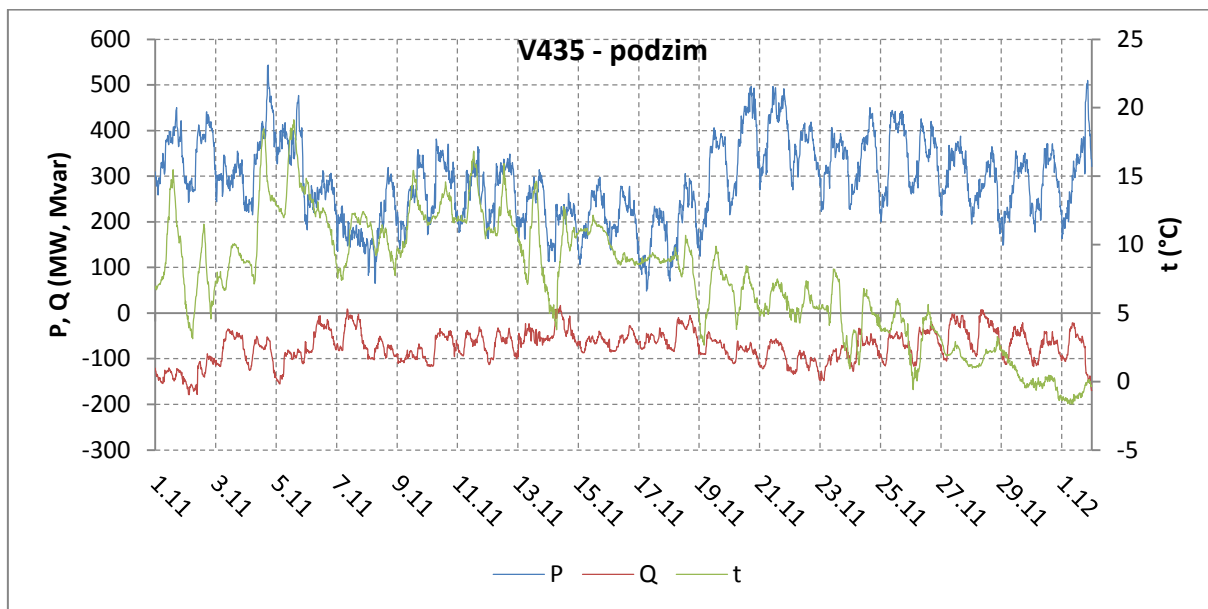
Tab. 16 - Souhrn dat v databázi podle jednotlivých linek v absolutních veličinách v létě

léto		V435	V441
$Q_{\max}$	(Mvar)	173,11	168,11
$Q_{\text{průměr}}$	(Mvar)	116,25	107,61
$Q_{\text{medián}}$	(Mvar)	118,63	111,24
$Q_{\min}$	(Mvar)	19,69	0,00
$U_{\max}$	(kV)	420,49	418,08
$U_{\text{průměr}}$	(kV)	416,30	408,39
$U_{\text{medián}}$	(kV)	416,28	412,32
$U_{\min}$	(kV)	411,73	0,00

V databázi je chyba v hodnotách měřené teploty z rozvodny Slavětice. Hodnota se pohybuje od -39 do -40 °C, které jsou zcela nereálné, proto jsem zvolil stejný postup získání teploty jako u linky V441.

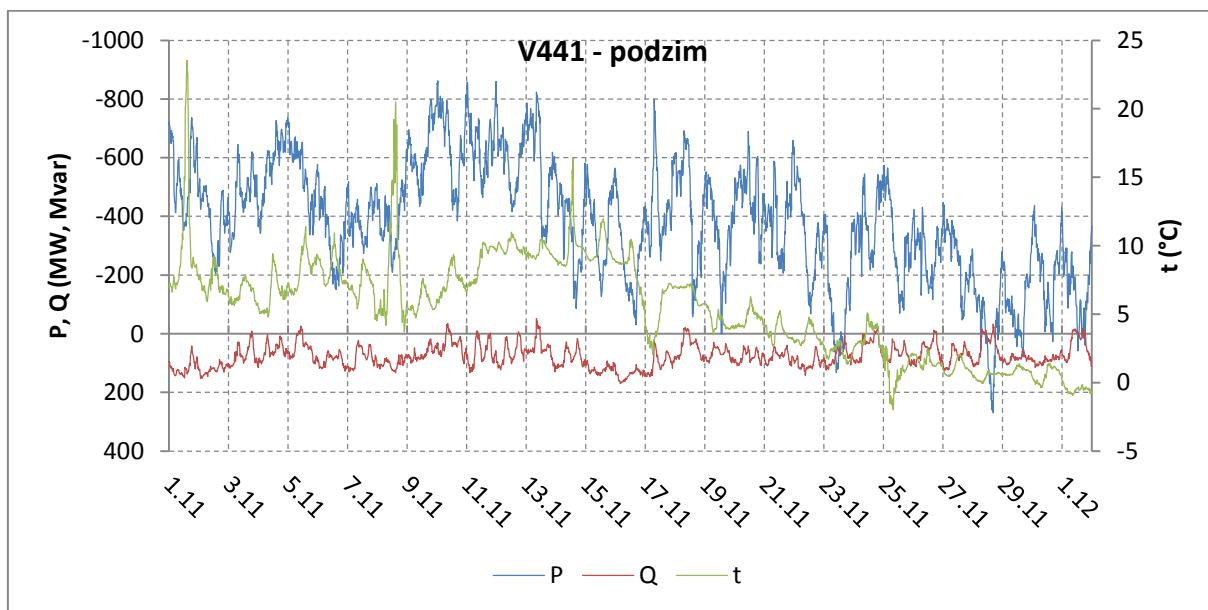
#### 5.4.4 Podzim (1. 11. – 2. 12. 2014)

Období od 1. 11. 2014 do 2. 12. 2014 bude z důvodu zkrácení názvů nadále popisováno jako „podzim“. U počasí nejpravděpodobněji nastane opačný vývoj vzhledem k počasí na jaře. S klesající teplotou a rostoucím úhrnem srážek lze očekávat nárůst ztrát korónou a svodem a poklesem Jouleových ztrát.



Graf 7 - měřené přenosy výkonů a teplota V435 na podzim

Graf 7 zobrazuje asi největší změny velikostí přenášeného výkonu ze všech zobrazených období. Špička 4. 11., následovaná propadem 8. 11. následuje týden se spíše nižšími výkony končící státním svátkem 17. 11. Na tomto průběhu je dobře pozorovatelný trend týdenního zatížení soustavy.



Graf 8 - měřené přenosy výkonů a teplota V441 na podzim

Zatížení V441 je oproti předchozímu období stálejší. Tok energie je téměř jednosměrný, ale trvalejší předvídatelnost vývoje situace se stále nezdá být reálná.

Tabulky zobrazující data v tomto ročním období získaná pomocí deskripčních statistických metod v absolutních i poměrných veličinách:

Tab. 17 - Souhrn dat v databázi podle jednotlivých linek v absolutních i poměrných veličinách na podzim

podzim	Absolutní veličiny			Poměrné veličiny												
		V435	V441	V435	V441											
P <sub>max</sub>	(MW)	543,55	861,98	39,87	63,22	(%)	S <sub>max</sub>									
P <sub>průměr</sub>	(MW)	288,59	390,14	21,17	28,61	(%)	S <sub>max</sub>									
P <sub>medián</sub>	(MW)	285,46	395,07	20,94	28,98	(%)	S <sub>max</sub>									
P <sub>min</sub>	(MW)	48,51	0,00	3,56	0,00	(%)	S <sub>max</sub>									
dP <sub>max</sub>	(MW)	2,21	16,70	0,407	1,937	(%)	P <sub>max</sub>									
dP <sub>průměr</sub>	(MW)	0,76	3,95	0,263	1,025	(%)	P <sub>průměr</sub>									
dP <sub>medián</sub>	(MW)	0,68	3,28	0,239	0,831	(%)	P <sub>medián</sub>									
dP <sub>min</sub>	(MW)	0,00	0,00	<table><tr><td>dP/P (%)</td><td>max</td><td>průměr</td></tr><tr><td>V 435</td><td>0,415</td><td>0,245</td></tr><tr><td>V 441</td><td>5,306</td><td>0,837</td></tr></table>				dP/P (%)	max	průměr	V 435	0,415	0,245	V 441	5,306	0,837
dP/P (%)	max	průměr														
V 435	0,415	0,245														
V 441	5,306	0,837														
t <sub>max</sub>	(°C)	19,13	23,55													
t <sub>průměr</sub>	(°C)	7,59	5,49													
t <sub>medián</sub>	(°C)	8,10	5,80													
t <sub>min</sub>	(°C)	-1,66	-1,98													
Δt <sub>max</sub>	(°C)	0,00	nelze													

Tab. 18 - Souhrn dat v databázi podle jednotlivých linek v absolutních veličinách na podzim

podzim		V435	V441
$Q_{\max}$	(Mvar)	179,06	170,10
$Q_{\text{průměr}}$	(Mvar)	73,19	76,25
$Q_{\text{medián}}$	(Mvar)	70,32	80,31
$Q_{\min}$	(Mvar)	0,09	0,00
$U_{\max}$	(kV)	420,73	419,76
$U_{\text{průměr}}$	(kV)	416,58	412,94
$U_{\text{medián}}$	(kV)	416,61	414,96
$U_{\min}$	(kV)	411,19	0,00

V databázi je chyba v hodnotách měřené teploty z rozvodny Slavětice. Hodnota se pohybuje od -39 do -40 °C, které jsou zcela nereálné, proto jsem zvolil stejný postup získání teploty jako u linky V441.



## 6 Rozbor technických ztrát, možnosti predikce ztrát pro vybraná vedení přenosové soustavy

Základní statistický rozbor databáze je uveden v minulé kapitole práce i s grafy zobrazujícími naměřené veličiny, u kterých je předpokládána závislost se ztrátami elektrické energie. Tato data jsou dostačující pro získání prvotního přehledu o stavech na vybraných linkách.

U V435 lze nejvíce měřených hodnot ve vzorku dat očekávat kolem velikostí průměrných přenášených výkonů (20 – 30 % maximálního přenášeného výkonu). Protože v analyzovaných časových intervalech je energie přenášena převážně jedním směrem, je výskyt hodnot možné charakterizovat intervalem přibližně 10 – 60 %.

Na rozdíl od první linky lze u V441, díky odlišnému diagramu zatížení a také časté změně směru přenosu energie, očekávat větší rozmanitost měřených hodnot a to od 0 až po přibližně 75 % maximálního zatížení linky.

Vysvětlení veličin, použitých v následující části:

$dP$	Ztráty činného výkonu	(MW)
$dP_J$	Vypočítané Jouleovy ztráty činného výkonu dle (3.22)	(MW)
$dP_O$	Ostatní ztráty činného výkonu	(MW)
$ \Delta x $	Absolutní hodnota absolutní odchylky	

### 6.1 Analýza ztrát a získání predikčních křivek

Rozbor technických ztrát je proveden postupem regresní analýzy. Data pro analýzu lze použít buď tak, jak jsou obsažena v databázi, nebo je možné je upravit pomocí vhodně zvoleného postupu a kritérií. Tímto kritériem může být například omezení množiny vstupních dat tak, že jsou spojitá data rozdělena na určité intervaly.

Pro získání hodnot všech ostatní grafů v této kapitole, kromě vyhodnocení regresních křivek Jouleových ztrát jsem použil následující postup:

Hodnoty veličiny na ose x jsou funkcí vypočítány pro všechna odpovídající pole. Následným zaokrouhlením velikostí těchto hodnot na určený počet desetinných míst a zprůměrováním všech odpovídajících hodnot druhé veličiny je získán bod grafu. (kombinace funkcí *ZAOKROUHLIT* a *AVERAGEIF*)

Podrobným popisem úpravy databáze databází s přesným postupem získání predikčních křivek se zabývá diplomová práce [13], proto se při popisu práce s databází omezím na stručnější postup.

Pro zhodnocení vhodnosti regresní křivky jsem využil hodnotu spolehlivosti R (koeficient determinace), kterou umožňuje MS Excel u matematických křivek zobrazit.

Pro ověření závislosti velikosti měřených technických ztrát na velikosti přenášeného činného výkonu je možné použít přímo data obsažená v databázi, což jsem také udělal. Na rozdíl od [7] jsem použil bodový graf se zobrazením pouze bodů. Hodnoty v databázi i závislosti zůstanou nezměněny, jen není možné použít spojnicový graf pro zobrazení všech přenášených výkonů pro danou hodnotu ztrát.

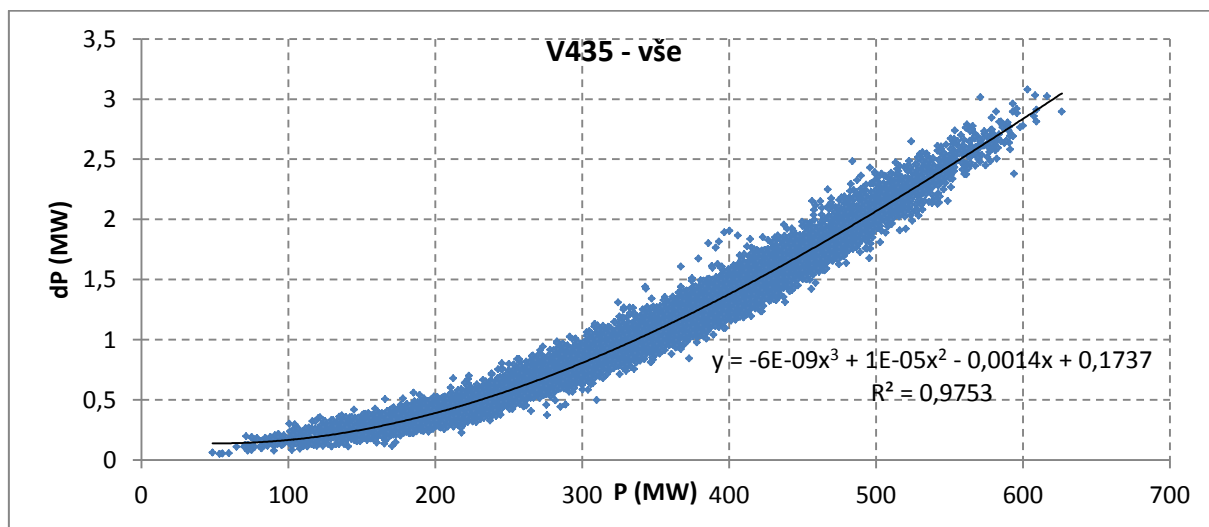
Protože zatím nedošlo ke zmenšení vzorku zkoumaných dat a databáze je poměrně obsáhlá, je tento postup poněkud náročnější na výpočetní výkon počítače.

Pro zjednodušení pojmenování jednotlivých období jsem již zavedl názvy podle dané roční doby. Nyní si k nim dovolím ještě přidat termín pro označení všech dat napříč ročními dobami ve vzorku a to termín: „vše“.

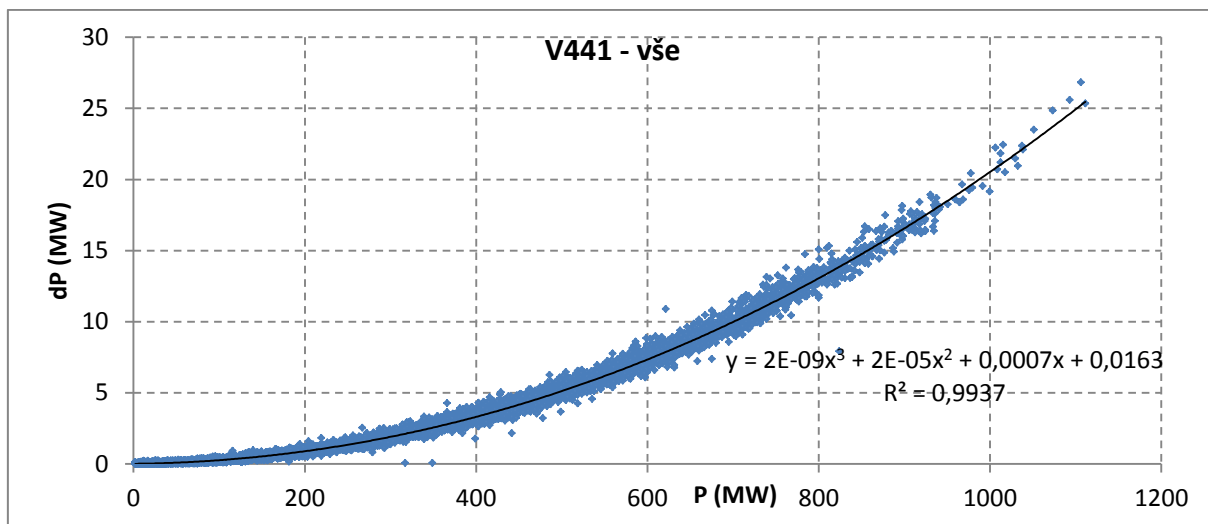
### 6.1.1 Vyhodnocení Jouleových ztrát z dat a výpočtem

Vyhodnocení závislosti Jouleových ztrát na velikosti přenášeného výkonu jsem provedl přímo z dat v databázi a také výpočtem dle vzorce 3.22. Pro výpočet jsou použity hodnoty výkonů a napětí z databáze a parametry vedení z Tab. 10. Získávání teploty pro výpočty teplotních závislostí je uvedeno v kapitole 5.4.

Grafy zobrazují data ze všech období, zobrazeny jsou i výsledky regrese spolu s rovnicí dané křivky a koeficientem determinace.



Graf 9 – Závislost Jouleových ztrát na přenášeném výkonu z měřených dat V435, všechna období

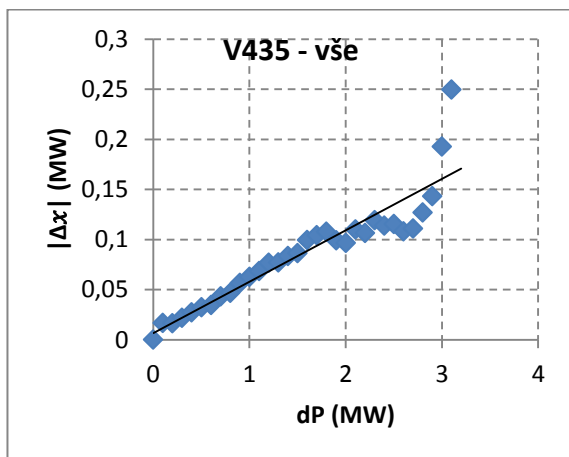


Graf 10 – Závislost Jouleových ztrát na přenášeném výkonu z měřených dat V441, všechna období

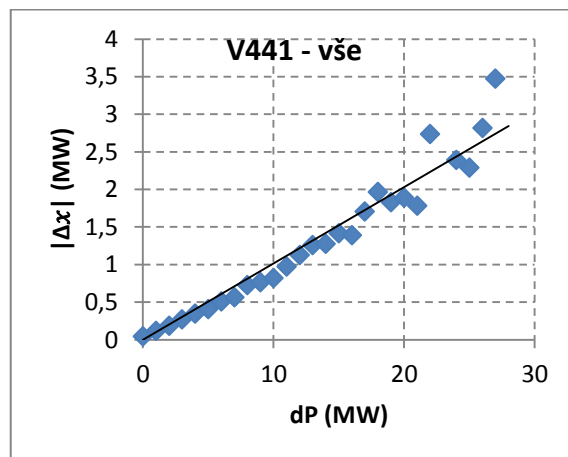
Hodnota absolutní chyby je vypočtena dle vzorce uvedeného v kapitole 4.6 a postupem uvedeným na začátku této kapitoly.

Absolutní chyba je absolutní hodnota rozdílu mezi regresní křivkou určenou podle měřených dat a regresní křivkou určenou z hodnot vypočítaných. Určuje tedy správnost zvolené křivky regresní analýzy a metody určené pro její získání (a tedy i ověření vypočítaných hodnot).

Z grafů jsou patrné jednotlivé odchylky vypočítaných a naměřených hodnot. Větší rozptýl hodnot odchylky u vyšších hodnot ztrát bude s největší pravděpodobností dán určitým rozptylem měřených hodnot a nepřesnými údaji při výpočtu (možná změna parametrů vedení a také již zmíněná problematika určení správné teploty).



Graf 11 – Absolutní odchylka vyhodnocení křivek Jouleových ztrát pro všechny výkony na V435



Graf 12 – Absolutní odchylka vyhodnocení křivek Jouleových ztrát pro všechny výkony na V435

### 6.1.2 Výpočet ostatních technických ztrát

Protože nejsou k dispozici údaje pro vypočítání zbývajících technických ztrát, mimo Jouleových, musel jsem pro jejich vyhodnocení na lince V435 přistoupit k následujícímu výpočtu:

$$dP_o = \frac{||P_{SOK}| - |P_{SLV}|| - dP}{l_{V435}} \quad (\text{MW} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (6.1)$$

$dP_o$  ostatní technické ztráty (MW·km<sup>-1</sup>)

$P_{SOK}$  činný výkon měřený v rozvodně Sokolnice (MW)

$P_{SLV}$  činný výkon měřený v rozvodně Sokolnice (MW)

$dP$  měřené Jouleovy ztráty (MW)

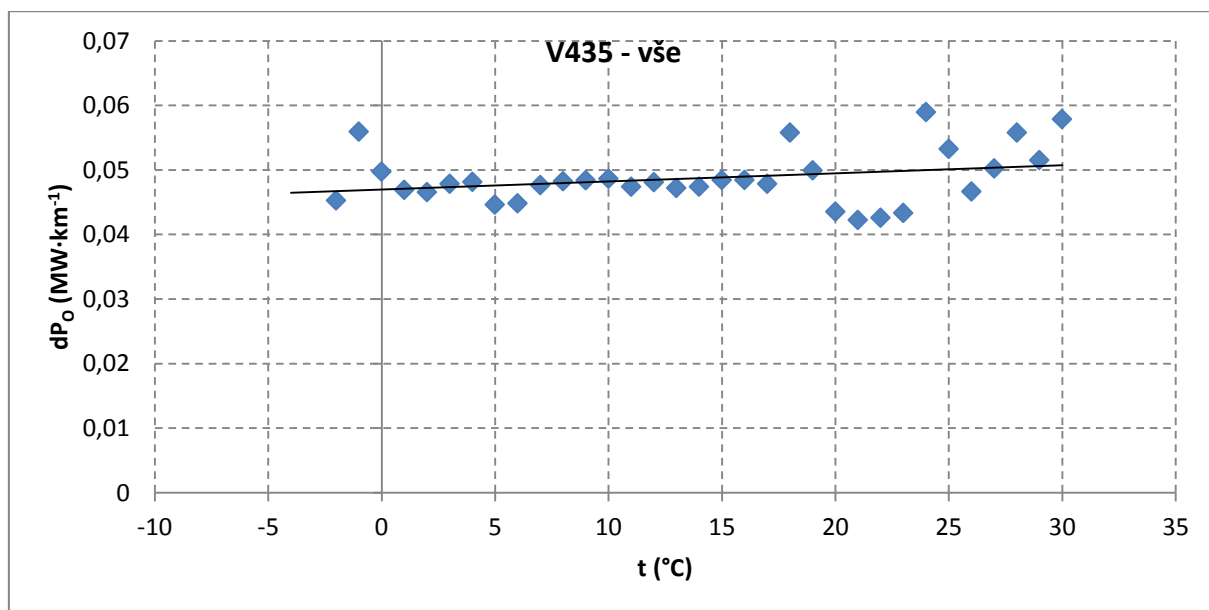
$l_{V435}$  délka vedení V435 (km)

*Pro výpočet hodnot pro V441 je použit analogický vzorec.*

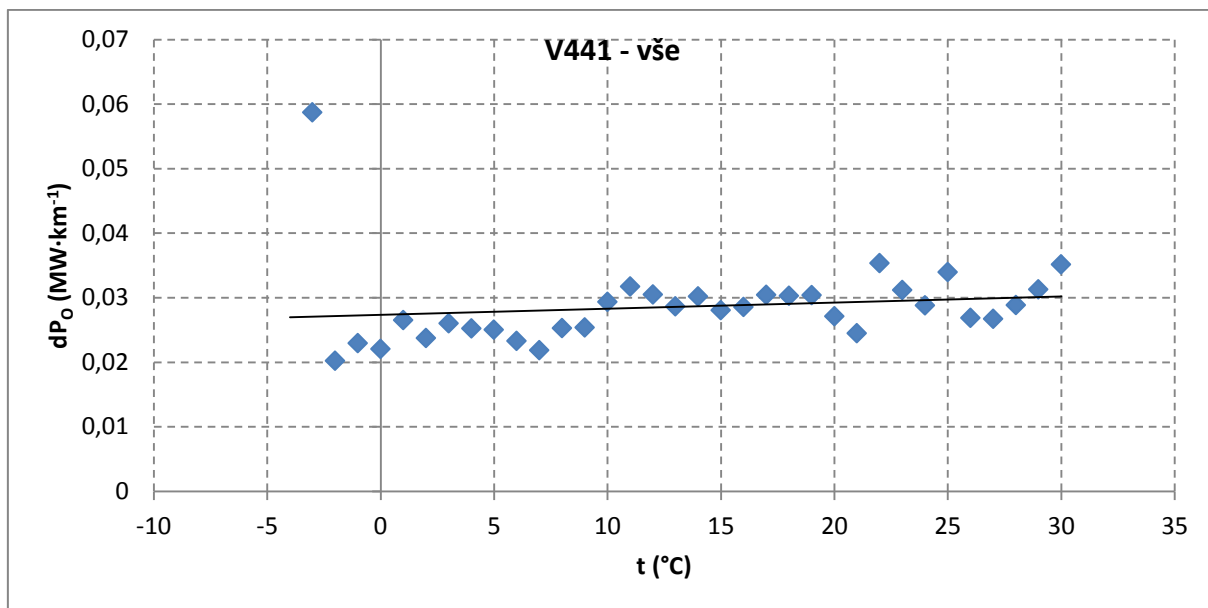
Následující grafy zobrazují hodnotu ostatních technických ztrát vztaženou na kilometr délky vedení.

Výsledné body grafu jsou vypočítány podle vzorce uvedeného na předchozí stránce a metody popsané na začátku této kapitoly, výpočet teploty je uveden v kapitole 5.4.

Při porovnání s Tab. 5 dosahují ztráty korónou na vedeních 400 kV při dešti přibližně 40 MW·km<sup>-1</sup>, myslím si proto, že se jedná o reálné hodnoty zbylých ztrát.



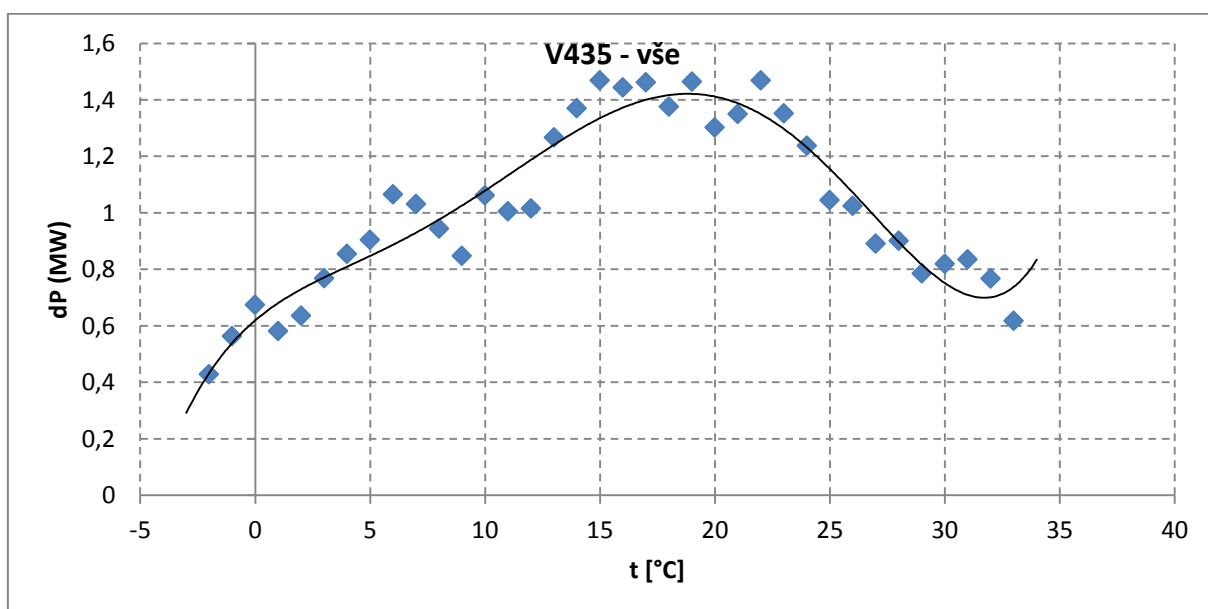
Graf 13 – Vyhodnocení ostatních technických ztrát na V435 podle teploty pro všechny období



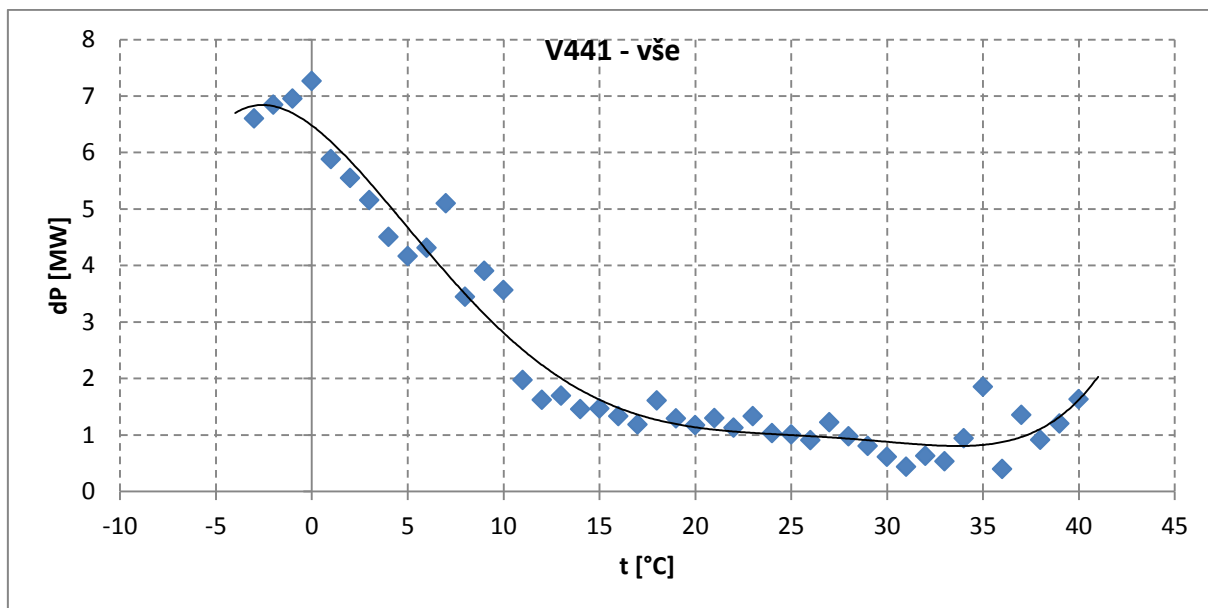
Graf 14 – Vyhodnocení ostatních technických ztrát na V441 podle teploty pro všechny období

### 6.1.3 Vyhodnocení závislosti Jouleových ztrát na teplotě

Pro vyhodnocení velikosti Jouleových ztrát na teplotě jsem se rozhodl použít postup popsany na začátku kapitoly. Jako zdroj hodnot Jouleových ztrát jsem použil velikosti ztrát původně obsažená v databázi.



Graf 15 – Vyhodnocení závislosti Jouleových ztrát na teplotě pro V435 pro všechna období



Graf 16 – Vyhodnocení závislosti Jouleových ztrát na teplotě pro V441 pro všechna období

## 6.2 Predikce

Rovnice křivek uvedených v následujících tabulkách byly získány analýzou jednotlivých období i všech dostupných hodnot. Protože se jedná o rozsáhlou databázi hodnot za relativně dlouhá období, je možné křivky zároveň použít pro predikci ztrát. Jejich použití je omezeno na linky vedení, pro které byly vypočítány. Také přesnost je omezena, a to především u polynomů, na interval hodnot extrémů pro dané období (tabulky 11 – 18).

Při získání křivek je třeba dát pozor na zaokrouhlené hodnoty jednotlivých vyhodnocených koeficientů. V tabulkách uvádím nejprve automaticky vygenerované rovnice křivek, poté následuje tabulka polynomických křivek, které jsou touto problematikou ovlivněny nejvíce. Koeficienty jsou zaokrouhleny s přesností na 14, respektive 10 platných desetinných míst. Problematika je demonstrována na srovnání predikčních křivek závislosti Jouleových ztrát na teplotě.

Pro polynomické křivky predikce měřených činných ztrát a přímky očekávaného vývoje odchylky je uveden i koeficient determinace pro porovnání kvality křivek pro jednotlivá období.

Odchylka reálné veličiny od výsledku predikce může být způsobena například z důvodu nepřesných vstupních hodnot, nepřesnostmi při výpočtech, zaokrouhlením koeficientu křivky, nebo použitou metodou analýzy.

### 6.2.1 Polynomy predikčních křivek V435

Tab. 19 - Výsledné rovnice křivek analyzovaných závislostí pro V435

V435			R <sup>2</sup>
$dP$ podle $P$	Vše	$dP = -6E-09 \cdot P^3 + 1E-05 \cdot P^2 - 0,0014 \cdot P + 0,1737$	0,9753
	Zima	$dP = -5E-09 \cdot P^3 + 1E-05 \cdot P^2 - 0,0019 \cdot P + 0,2621$	0,9685
	Jaro	$dP = -6E-09 \cdot P^3 + 1E-05 \cdot P^2 - 0,0021 \cdot P + 0,4042$	0,9573
	Léto	$dP = 4E-09 \cdot P^3 + 2E-06 \cdot P^2 + 0,0025 \cdot P - 0,2053$	0,9743
	Podzim	$dP = -6E-09 \cdot P^3 + 1E-05 \cdot P^2 - 0,0011 \cdot P + 0,1329$	0,9706
$dP_J$	Vše	$dP = -1E-09 \cdot P^3 + 9E-06 \cdot P^2 - 0,0005 \cdot P + 0,1236$	0,9863
$ \Delta x  = dP - dP_J$	Vše	$\Delta x = 0,0513 \cdot P + 0,0064$	0,8507
	Zima	$\Delta x = 0,0702 \cdot P$	0,9002
	Jaro	$\Delta x = 0,0573 \cdot P + 0,028$	0,8523
	Léto	$\Delta x = 0,026 \cdot P + 0,0123$	0,8657
	Podzim	$\Delta x = 0,0306 \cdot P + 0,0178$	0,6192
$dP_O$	Vše	$dP_O = 0,0001 \cdot t + 0,047$	
	Zima	$dP_O = -0,0002 \cdot t + 0,0488$	
	Jaro	$dP_O = 1E-04 \cdot t + 0,0442$	
	Léto	$dP_O = 0,0001 \cdot t + 0,0452$	
	Podzim	$dP_O = 3E-05 \cdot t + 0,0489$	
$dP$ podle $t$	Vše	$dP = 8E-07 \cdot t^5 - 5E-05 \cdot t^4 + 0,0011 \cdot t^3 - 0,0093 \cdot t^2 + 0,0696 \cdot t + 0,6192$	
	Zima	$dP = 2E-06 \cdot t^5 - 4E-05 \cdot t^4 - 0,0005 \cdot t^3 + 0,0116 \cdot t^2 + 0,0163 \cdot t + 0,3179$	
	Jaro	$dP = 7E-06 \cdot t^5 - 0,0004 \cdot t^4 + 0,0083 \cdot t^3 - 0,0739 \cdot t^2 + 0,2551 \cdot t + 1,2763$	
	Léto	$dP = -1E-06 \cdot t^5 + 0,0002 \cdot t^4 - 0,0064 \cdot t^3 + 0,1137 \cdot t^2 - 0,8524 \cdot t + 3,494$	
	Podzim	$dP = -2E-05 \cdot t^5 + 0,0007 \cdot t^4 - 0,0081 \cdot t^3 + 0,0225 \cdot t^2 + 0,0759 \cdot t + 0,6463$	

Průměrná hodnota relativní odchylky je vypočítána podle predikčních křivek absolutní odchylky a vztahuje se ke ztrátám (nikoliv přenášenému výkonu).

Tab. 20 - Průměrná hodnota relativní odchylky měřených a vypočítaných Jouleových ztrát pro V435

$\delta(dP)$	vše	zima	jaro	léto	podzim
(%)	5,43	7,02	7,03	3,17	3,88

## 6.2.2 Polynomy predikčních křivek V441

Tab. 21 - Výsledné rovnice křivek analyzovaných závislostí pro V435

V441			R <sup>2</sup>
$dP$ podle $P$	Vše	$dP = 2E-09 \cdot P^3 + 2E-05 \cdot P^2 + 0,0007 \cdot P + 0,0163$	0,9937
	Zima	$dP = 3E-09 \cdot P^3 + 2E-05 \cdot P^2 + 0,0016 \cdot P - 0,0654$	0,9938
	Jaro	$dP = -6E-12 \cdot P^3 + 2E-05 \cdot P^2 + 0,0003 \cdot P + 0,0188$	0,9882
	Léto	$dP = -3E-09 \cdot P^3 + 2E-05 \cdot P^2 - 8E-05 \cdot P + 0,067$	0,9769
	Podzim	$dP = 4E-09 \cdot P^3 + 2E-05 \cdot P^2 + 0,0017 \cdot P - 0,0401$	0,9851
$dP_J$	Vše	$dP = 5E-10 \cdot P^3 + 2E-05 \cdot P^2 + 0,0006 \cdot P + 0,024$	0,9989
$ \Delta x  = dP - dP_J$	Vše	$\Delta x = 0,1016 \cdot P$	0,9408
	Zima	$\Delta x = 0,0999 \cdot P$	0,9308
	Jaro	$\Delta x = 0,0631 \cdot P + 0,0431$	0,937
	Léto	$\Delta x = 0,0728 \cdot P + 0,0071$	0,7187
	Podzim	$\Delta x = 0,1244 \cdot P$	0,9051
$dP_O$	Vše	$dP_O = 1E-04 \cdot t + 0,0274$	
	Zima	$dP_O = -0,0003 \cdot t + 0,0261$	
	Jaro	$dP_O = 0,0003 \cdot t + 0,0304$	
	Léto	$dP_O = -1E-04 \cdot t + 0,0317$	
	Podzim	$dP_O = 0,0002 \cdot t + 0,0238$	
$dP$ podle $t$	Vše	$dP = 1E-06 \cdot t^5 - 1E-04 \cdot t^4 + 0,0033 \cdot t^3 - 0,0353 \cdot t^2 - 0,2555 \cdot t + 6,4788$	
	Zima	$dP = 1E-05 \cdot t^5 - 0,0009 \cdot t^4 + 0,0222 \cdot t^3 - 0,1987 \cdot t^2 + 0,0287 \cdot t + 9,2601$	
	Jaro	$dP = -8E-07 \cdot t^5 + 6E-05 \cdot t^4 - 0,0016 \cdot t^3 + 0,0144 \cdot t^2 + 0,0109 \cdot t + 1,1128$	
	Léto	$dP = -2E-06 \cdot t^5 + 0,0003 \cdot t^4 - 0,0125 \cdot t^3 + 0,2439 \cdot t^2 - 2,111 \cdot t + 7,1232$	
	Podzim	$dP = -5E-05 \cdot t^5 + 0,0028 \cdot t^4 - 0,0528 \cdot t^3 + 0,3332 \cdot t^2 - 0,0574 \cdot t + 1,4269$	

Průměrná hodnota relativní odchylky je vypočítána podle predikčních křivek absolutní odchylky a vztahuje se ke ztrátám (nikoliv přenášenému výkonu).

Tab. 22 - Průměrná hodnota relativní odchylky měřených a vypočítaných Jouleových ztrát pro V435

$\delta(dP)$	vše	zima	jaro	léto	podzim
(%)	10,16	9,99	6,87	7,37	12,44



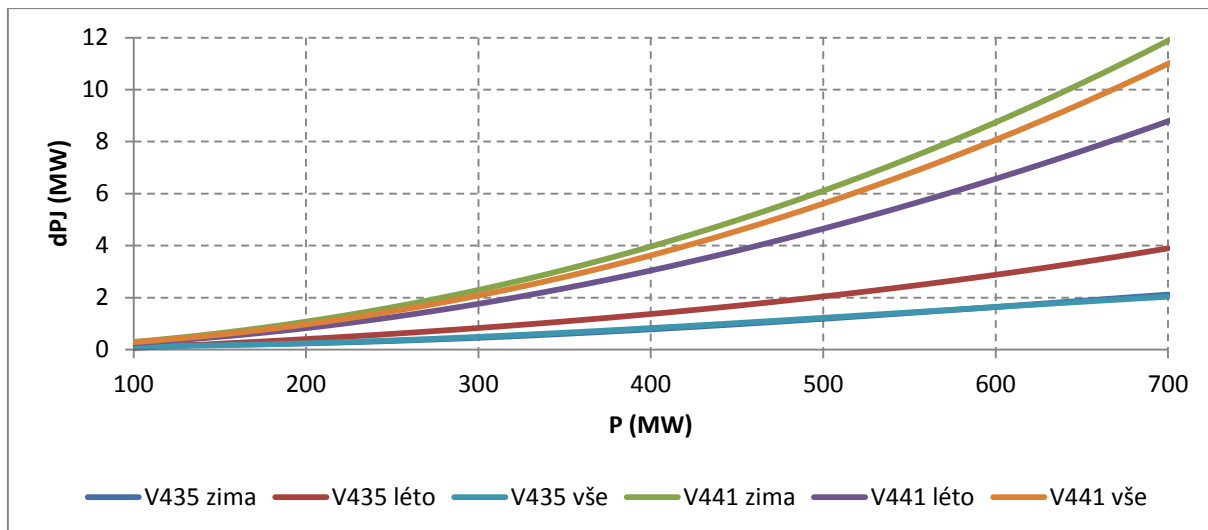
Tab. 23 - Přesnější predikční křivky polynomiálních funkcí

Přesnější rovnice predikčních křivek (koeficienty zaokrouhleny na 14, respektive 10 platných míst)			
V435	$dP$ podle $P$	Vše	$dP = -0,00000000634326 \cdot P^3 + 0,00001346045347 \cdot P^2 - 0,00135728173512 \cdot P + 0,17365760914965$
		Zima	$dP = -0,00000000479936 \cdot P^3 + 0,00001350804488 \cdot P^2 - 0,00186286946496 \cdot P + 0,26210498868372$
		Jaro	$dP = -0,00000000593657 \cdot P^3 + 0,00001387163187 \cdot P^2 - 0,00207046557779 \cdot P + 0,40415014745526$
		Léto	$dP = 0,00000000379074 \cdot P^3 + 0,00000203243871 \cdot P^2 + 0,00253185225928 \cdot P - 0,20525163107172$
		Podzim	$dP = -0,00000000640167 \cdot P^3 + 0,00001268662416 \cdot P^2 - 0,00113347065798 \cdot P + 0,13294318834310$
	$dP_J$	Vše	$dP = -0,00000000125493 \cdot P^3 + 0,00000931561321 \cdot P^2 - 0,00053466555858 \cdot P + 0,12356574371172$
	$dP$ podle $t$	Vše	$dP = 0,0000007540 \cdot t^5 - 0,0000529453 \cdot t^4 + 0,0011472041 \cdot t^3 - 0,0092970888 \cdot t^2 + 0,0695947830 \cdot t + 0,6191689743$
		Zima	$dP = 0,0000020085 \cdot t^5 - 0,0000447740 \cdot t^4 - 0,0004530112 \cdot t^3 + 0,0116439934 \cdot t^2 + 0,0163039083 \cdot t + 0,3178613128$
		Jaro	$dP = 0,0000071048 \cdot t^5 - 0,0004066528 \cdot t^4 + 0,0083454714 \cdot t^3 - 0,0738879724 \cdot t^2 + 0,2551116479 \cdot t + 1,2763027942$
		Léto	$dP = -0,0000014705 \cdot t^5 + 0,0001598494 \cdot t^4 - 0,0064162505 \cdot t^3 + 0,1137487356 \cdot t^2 - 0,8524164067 \cdot t + 3,4939885351$
		Podzim	$dP = -0,0000169014 \cdot t^5 + 0,0006755955 \cdot t^4 - 0,0080718242 \cdot t^3 + 0,0224608183 \cdot t^2 + 0,0758899520 \cdot t + 0,6462872238$
V441	$dP$ podle $P$	Vše	$dP = 0,00000000151599 \cdot P^3 + 0,00001829699285 \cdot P^2 + 0,00069168631565 \cdot P + 0,01627996623751$
		Zima	$dP = 0,00000000332497 \cdot P^3 + 0,00001571186872 \cdot P^2 + 0,00159746849056 \cdot P - 0,06535013688371$
		Jaro	$dP = -0,0000000000569 \cdot P^3 + 0,00001966256792 \cdot P^2 + 0,00031818422717 \cdot P + 0,01882019988293$
		Léto	$dP = -0,00000000256422 \cdot P^3 + 0,00002141740623 \cdot P^2 - 0,00007592882936 \cdot P + 0,06697189569502$
		Podzim	$dP = 0,00000000431590 \cdot P^3 + 0,00001549044338 \cdot P^2 + 0,00165722184349 \cdot P - 0,04006735200120$
	$dP_J$	Vše	$dP = 0,00000000053637 \cdot P^3 + 0,00001746769711 \cdot P^2 + 0,00056033980901 \cdot P + 0,02404556328007$
	$dP$ podle $t$	Vše	$dP = 0,0000009804 \cdot t^5 - 0,0000973340 \cdot t^4 + 0,0032918392 \cdot t^3 - 0,0353314987 \cdot t^2 - 0,2554597832 \cdot t + 6,4787554728$
		Zima	$dP = 0,0000124404 \cdot t^5 - 0,0009005298 \cdot t^4 + 0,0222443181 \cdot t^3 - 0,1987304462 \cdot t^2 + 0,0286656829 \cdot t + 9,2601182077$
		Jaro	$dP = -0,0000007526 \cdot t^5 + 0,0000603503 \cdot t^4 - 0,0016333488 \cdot t^3 + 0,0144215447 \cdot t^2 + 0,0109278349 \cdot t + 1,1128334845$
		Léto	$dP = -0,0000024502 \cdot t^5 + 0,0002880320 \cdot t^4 - 0,0124697390 \cdot t^3 + 0,2439048190 \cdot t^2 - 2,1109921385 \cdot t + 7,1231906105$
		Podzim	$dP = -0,0000487778 \cdot t^5 + 0,0028003446 \cdot t^4 - 0,0527845768 \cdot t^3 + 0,3332206459 \cdot t^2 - 0,0573706284 \cdot t + 1,4269312937$

### 6.2.3 Porovnání predikčních křivek V435 a V441

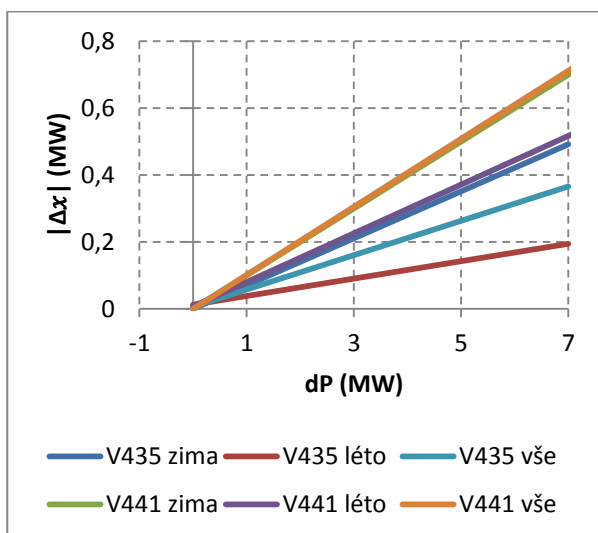
Následující grafy uvádím pro možnost porovnání predikčních křivek

Upozorňuji, že pro větší přehlednost demonstrováných rozdílů predikčních křivek jsou v následujícím grafu použity automaticky zaokrouhlené křivky, které nejsou přesné.

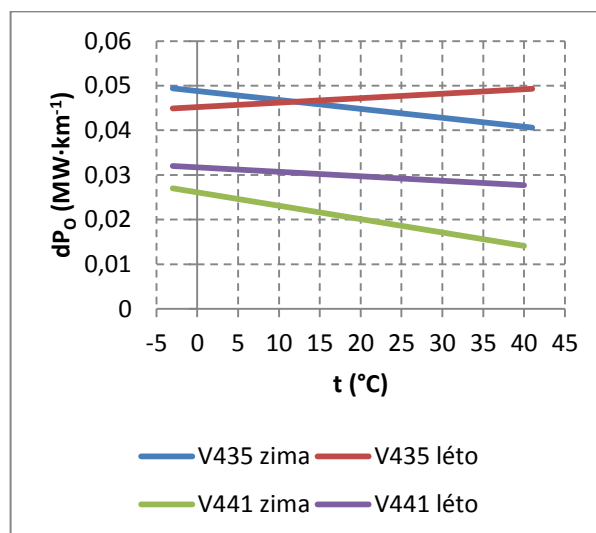


Graf 17 – Porovnání predikce Jouleových ztrát (orientační polynomy)

Graf 19 ukazuje, že je třeba respektovat interval hodnot, na základě kterého byla predikční křivka získána. Predikce pro zimní období V441 je u 40°C v celé souboru predikcí nejnížší, ale také nedosažitelná.



Graf 18 – Porovnání predikce absolutní chyby



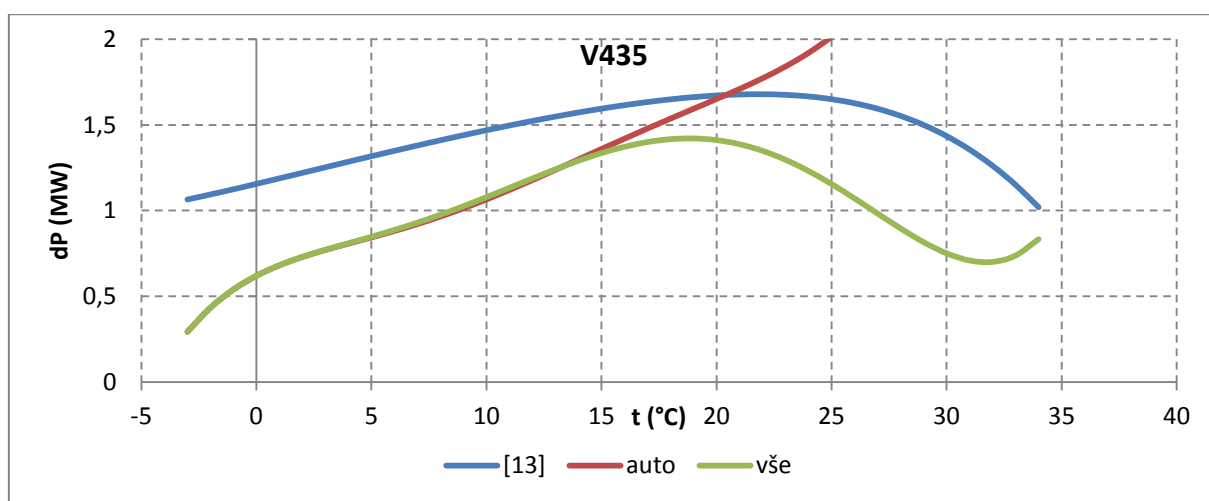
Graf 19 – Porovnání predikce ostatních ztrát

#### 6.2.4 Porovnání výsledků s [13]

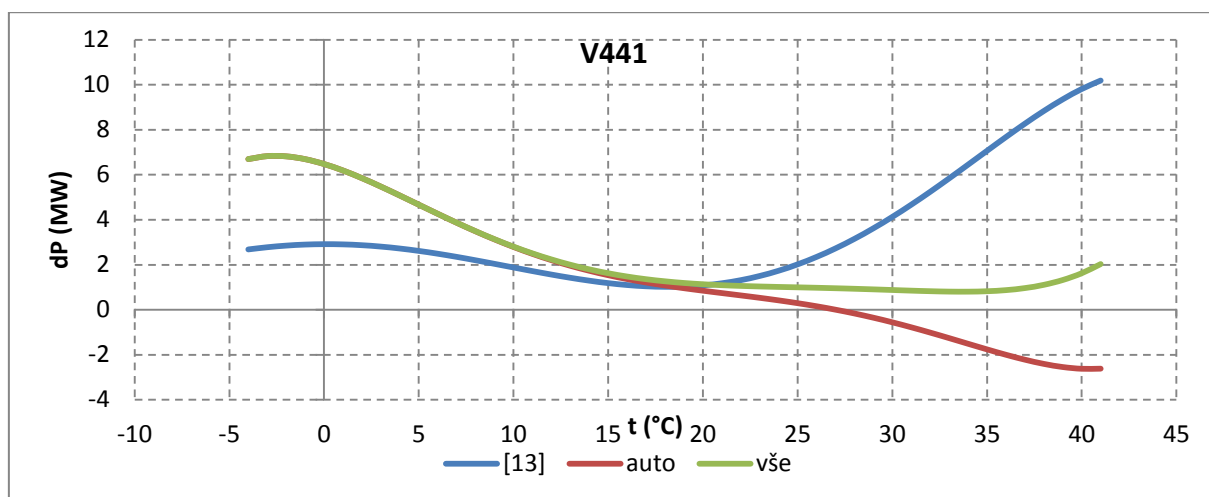
Následující grafy jsou uvedeny pro možnost porovnání výsledné hodnoty predikční křivky automaticky generované MS Excel (název: auto), přesnější predikční křivky (název: vše) a predikční křivky dle [13].

Tab. 24 – Polynomy predikčních křivek pro V435 a V441

V435	[13]	$P_z = -5E-08T^5 + 2E-06T^4 - 5E-05T^3 + 0,0003T^2 + 0,0318T + 1,1559$
	Tato práce	$dP = 8E-07 \cdot t^5 - 5E-05 \cdot t^4 + 0,0011 \cdot t^3 - 0,0093 \cdot t^2 + 0,0696 \cdot t + 0,6192$
V441	[13]	$P_z = -5E-07T^5 + 3E-05T^4 + 5E-05T^3 - 0,0138T^2 + 0,0044T + 2,9167$
	Tato práce	$dP = 1E-06 \cdot t^5 - 1E-04 \cdot t^4 + 0,0033 \cdot t^3 - 0,0353 \cdot t^2 - 0,2555 \cdot t + 6,4788$



Graf 20 - Predikce Jouleových ztrát v závislosti na teplotě pro V435



Graf 21 - Predikce Jouleových ztrát v závislosti na teplotě pro V441

Křivky „auto“ a „vše“ mají stejný původ, ale rozdílnou přesnost koeficientů ovlivňujících konečný tvar. Proto je nutné dodržovat minimální přesnost pro koeficienty a zaokrouhlovat minimálně na dvě platné cifry. Podobnost s predikčními křivkami [13] je zřejmá, ale predikci ověřit nelze.

## 7 Závěr

V diplomové práci bylo nastíněno řešení problematiky výpočtu analýzy a predikce technických ztrát na vedeních přenosové soustavy. Teoreticky byl na odpovídající úrovni popsán rozbor Jouleových ztrát, ztrát korónou a ztrát svodem, včetně aplikace vybraných vzorců při návrhu řešení predikce ztrát.

Z analýzy teoretické části je zřejmé, že Jouleovy ztráty jsou nejvíce ovlivněny přenášeným výkonem a odporem vedení, kdy obojí má za následek oteplování vodiče. Velikost ztrát korónou je dána elektrickou pevností vzduchu. Na tuto veličinu má největší vliv stav počasí na daném místě. Z toho vyplývá, že ztráty jsou, při konstantním napětí, nejvíce ovlivněny právě stavem počasí. Při slunečném dni jsou téměř minimální, v zimních měsících ale mohou přesáhnout až  $1600 \text{ MW}\cdot\text{km}^{-1}$ . Ztráty svodem jsou ovlivněny krom počasí i celkovým stavem izolačních prvků.

Všechny tyto poznatky lze aplikovat na výpočty přenosových vedení s rozprostřenými parametry. Za nejvhodnější náhradní členek pro tento typ úloh je považován „ $\pi$ “ členek, který má největší přesnost.

Aby bylo možné výskyt ztrát predikovat, je nejprve důležité provést analýzu a získat alespoň částečný přehled o přenosových poměrech. Jako vhodný nástroj základní analýzy poslouží základní matematické a statistické funkce.

Pokud se podaří nalézt vhodné závislosti na mezi některými veličinami statistického souboru a této závislosti popsat některou z funkcí je možná tuto funkci použít pro predikci ztrát na vhodných veličinách a intervalech. Regresní analýza je možným nástrojem. Pokud se databáze týče, je vhodné mít k dispozici co nejvíce hodnot z různých období.

Poskytnuta mi byla databáze několika vybraných linek přenosové soustavy, ze kterých jsem si vybral dvě. A ty dále zpracoval v programu MS Excel. Data jsou uložena v intervalu 15 minut. U elektrických veličin sice není k dispozici velikost odchylky jednotlivých měřicích přístrojů, ale vzhledem k výskytu jiných faktorů ovlivňujících kvalitu analýzy je možné tento fakt zanedbat.

Jako největší problém a překážka pro dosažení lepších výsledků se jeví absence kvalitního souboru meteorologických dat. Měření teploty pouze v koncových rozvodných stanicích například 100 km dlouhé linky se skutečně nezdá být postačující. Pro dosažení lepších výsledků by bylo vhodné rozdělit vedení na intervaly a měřit teplotu alespoň okolního vzduchu. Takto by bylo možné získat alespoň určitý přehled o teplotním profilu trasy a zlepšit přesnost výpočtu a zahrnout nové možnosti analýzy. Ztráty korónou a svodem nebylo z tohoto důvodu možné vypočítat pomocí uvedených vzorců, ale pouze jako doplňku Jouleových ztrát. Jako ještě vhodnější se jeví instalace měřicích zařízení přímo na lana vodičů. Potom by bylo možné pracovat rovnou s hodnotou oteplení vodičů. Měřicí zařízení by také mohlo zaznamenávat úhrn srážek a rychlost větru. Tak by bylo možné v reálném čase na základě aktuální zatížitelnosti jednotlivých linek řídit celou síť a vyrovnat se s možnými neobvyklými stavy efektivněji.

Výsledné polynomy křivek použitelných pro predikci jsou uvedeny ve dvou různých přesnostech z důvodu zmíněné problematiky automatického zaokrouhlování a následné nemožnosti věrné reprodukce téhož polynomu.

Regresní analýza prokázala (zřejmou) souvislost mezi přenášeným výkonem a velikostí Jouleových ztrát. Závislost velikosti ztrát na teplotě okolí je vyhodnocena také, ale zdá se být ovlivněna velkou nepřesností vlivem aproximace teploty mezi rozvodnami. Ostatní technické ztráty jsou vyhodnoceny jako přímky, vzhledem k neexistenci dat není možné tyto ztráty rozdělit dále.

Zajímavou možností by zajisté bylo ověření platnosti predikčních polynomů v praxi s případnou analýzou chyby a možným zlepšením výpočtové metodiky.

## 8 Literatura

- [1] KUBÍN, Miroslav. *Přenosy elektrické energie ČR v kontextu evropského vývoje*. Praha: ČEPS, 2006.
- [2] TLUSTÝ, Josef. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [3] PAVLOVSKÝ, Bohumír. *Ztráty v přenosu a rozvodu elektrické energie*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959. Řada energetické literatury.
- [4] Rudolf, L. *Komplexní rozbor technických ztrát přenosové soustavy*, habilitační práce, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009
- [5] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektroenergetika [Hradílek, 1992, záznam a]*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1992. ISBN 80-7078-132-7.
- [6] SEIFER, Marc J. *Nikola Tesla: vizionář - génius - čaroděj*. Vyd. 1. Přeložil Aleš DROBEK. Praha: Triton, 2007. ISBN 978-80-7254-884-2.
- [7] *Vývoj přenosové soustavy* [online]. Praha: ČEPS [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/Vyvoj-PS.aspx>
- [8] *Údaje o PS* [online]. Praha: ČEPS [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/Udaje-o-PS.aspx>
- [9] *Rozvoj PS* [online]. Praha: ČEPS [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/Rozvoj-PS.aspx>
- [10] *Map* [online]. Brussels: ENTSO-E [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <https://www.entsoe.eu/map/Pages/default.aspx>
- [11] Příspěvatelé Wikipedie, *Ztráty elektrické energie* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2016, Datum poslední revize 5. 01. 2016, 09:43 UTC, [cit. 2016-04-19] [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Ztr%C3%A1ty\\_elektrick%C3%A9\\_energie&oldid=13199519](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Ztr%C3%A1ty_elektrick%C3%A9_energie&oldid=13199519)
- [12] Bohumil Vybíral, *ZPRACOVÁNÍ DAT FYZIKÁLNÍCH MĚŘENÍ* [online], Fyzikální olympiáda, c2015, [citováno 10. 04. 2016] <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/mereni.pdf>
- [13] VACULÍK, P. *Predikce technických ztrát s ohledem na změny venkovní teploty u vedení přenosové soustavy*. Diplomová práce. Ostrava: VŠB -TU Ostrava, 2011
- [14] ŠAMAJ, A. *Využití SW prostředků pro výpočty technických ztrát u vedení přenosové soustavy*. Diplomová práce. Ostrava: VŠB-TUO Ostrava, 2011